

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA,  
METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**

**E.A.P. DE INGENIERÍA METALÚRGICA**

**Recuperación de oro en minerales sulfurados de baja  
ley en la provincia de Casma**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

**AUTORES**

Diego Armando Julca Vera

Jorge Alberto Ortiz Barreto

**ASESOR**

Vidal Sixto Aramburú Rojas

Lima - Perú

2017

## CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	iii
NOMENCLATURA	iv
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	3
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
2.1.1 EL PROBLEMA FUNDAMENTAL	4
2.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
2.2.1 JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICA	4
2.3 OBJETIVOS:	5
2.3.1 OBJETIVO GENERAL	5
2.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2.4 HIPÓTESIS Y VARIABLES	5
2.4.1 HIPÓTESIS GENERAL	5
2.4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	5
2.4.3 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	6
2.4.4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	7
<b>CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO</b>	9
3.1 ANTECEDENTES	9
3.2 UBICACIÓN DE LA PROVINCIA DE CASMA	11
3.2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA	11
3.2.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	11
3.3 ESTUDIO DEL ORO	12
3.3.1 EL PAPEL DEL ORO EN LA HISTORIA	12
3.3.2 EL ORO EN LA NATURALEZA	14
3.3.3 MINERALES AURÍFEROS PRINCIPALES	15
3.3.4 TIPOS DE YACIMIENTOS AURÍFEROS	17
3.3.5 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ORO	19

3.3.6	PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ORO	20
3.3.7	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ORO	20
3.3.8	UTILIDADES DEL ORO	21
3.4	PRODUCCIÓN Y COMERCIO DEL ORO	25
3.4.1	PRODUCCIÓN NACIONAL DEL ORO POR REGIONES	25
3.4.2	PRODUCCIÓN NACIONAL DEL ORO POR COMPAÑÍA	29
3.4.3	PRODUCCIÓN INTERNACIONAL DEL ORO POR PAÍS	32
3.4.4	EXPORTACIONES	34
3.4.5	COTIZACIÓN DEL ORO	36
3.4.5.1	COTIZACIÓN PROYECTADA DEL ORO	37
3.4.6	FACTORES QUE AFECTAN AL PRECIO DEL ORO	38
3.4.7	CARTERA DE INVERSIONES MINERAS EN EL PERÚ	40
3.4.8	INVERSIÓN EN PROYECTOS AURÍFEROS Y ARGENTÍFEROS	42
3.5	MÉTODOS DE TRATAMIENTO EN MENAS AURÍFERAS	43
3.5.1	CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA	43
3.5.1.1	GENERALIDADES	43
3.5.1.2	FUNDAMENTOS Y CRITERIOS DE APLICACIÓN	44
3.5.1.3	MÉTODOS DE SEPARACIÓN POR GRAVEDAD	45
3.5.1.4	EQUIPOS DE CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA	46
3.5.1.5	CONCENTRADORES CONVENCIONALES	46
3.5.2	CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA - CENTRÍFUGA	52
3.5.2.1	GENERALIDADES	52
3.5.2.2	EQUIPOS DE CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA - CENTRÍFUGA	52
3.5.2.3	CONCENTRADORES FALCON	53
3.5.2.4	CONCENTRADORES KNELSON	62
3.5.3	FLOTACIÓN	64
3.5.3.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	64
3.5.3.2	VARIABLES DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE FLOTACIÓN	68
3.5.3.3	FLOTACIÓN DEL ORO	69
3.5.4	CIANURACIÓN	78

3.5.4.1	PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN LA DISOLUCIÓN DEL ORO	79
3.5.4.2	MÉTODOS DE CIANURACIÓN DE MENAS DE ORO Y PLATA	82
3.5.4.3	USO DEL CIANURO EN LA PRODUCCIÓN DEL ORO	86
3.5.4.4	REACCIONES QUÍMICAS DEL PROCESO DE CIANURACIÓN	86
3.5.4.5	CINÉTICA DE LA CIANURACIÓN DEL ORO	89
	<b>CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA</b>	91
4.1	TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	91
4.2	UNIDAD DE ANÁLISIS	92
4.3	POBLACIÓN DE ESTUDIO	92
4.4	TAMAÑO DE MUESTRA	92
4.5	SELECCIÓN DE MUESTRA	92
4.6	PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN	93
4.7	ANÁLISIS MINERALÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN	95
4.7.1	INTERPRETACIÓN MINERALÓGICA	95
4.7.2	DISTRIBUCIÓN VOLUMÉTRICA Y GRADOS DE LIBERACIÓN	96
4.7.3	INTERPRETACIÓN DEL GRADO DE LIBERACIÓN	97
	<b>CAPÍTULO V: PRUEBAS EXPERIMENTALES</b>	106
5.1	PRUEBAS DE PRECONCENTRACIÓN EN EL CONCENTRADOR FALCON	106
5.1.1	CONDICIONES DE LA PRUEBA	106
5.1.2	RESULTADOS DE LA PRECONCENTRACIÓN A 50.33% -200m.	107
5.1.3	RESULTADOS DE LA PRECONCENTRACIÓN A 59.45% -200m.	107
5.1.4	RESULTADOS DE LA PRECONCENTRACIÓN A 67.80% -200m.	108
5.1.5	RESULTADOS DE LA PRECONCENTRACIÓN A 73.58% -200m.	108
5.2	PRUEBAS DE FLOTACIÓN DE LOS RELAVES DE PRECONCENTRACIÓN	110
5.2.1	CONDICIONES DE LA PRUEBA	110
5.2.2	RESULTADOS DE LA FLOTACIÓN PARA UN CONSUMO DE 24.70 g/TM DE AR-1208	111
5.2.3	RESULTADOS DE LA FLOTACIÓN PARA UN CONSUMO DE 49.40 g/TM DE AR-1208	111

5.2.4	RESULTADOS DE LA FLOTACIÓN PARA UN CONSUMO DE 74.10 g/TM DE AR-1208	112
5.2.5	RESULTADOS DE LA FLOTACIÓN PARA UN CONSUMO DE 98.80 g/TM DE AR-1208	112
5.3	PRUEBAS DE CIANURACIÓN DE LOS CONCENTRADOS DE LA PRECONCENTRACIÓN Y DE LA FLOTACIÓN	114
5.3.1	CONDICIONES DE LA PRUEBA	114
5.3.2	RESULTADOS DE LA CIANURACIÓN A 12 HORAS	115
5.3.3	RESULTADOS DE LA CIANURACIÓN A 24 HORAS	115
5.3.4	RESULTADOS DE LA CIANURACIÓN A 48 HORAS	116
5.3.5	RESULTADOS DE LA CIANURACIÓN A 72 HORAS	116
	<b>CAPÍTULO VI: INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS</b>	118
	<b>CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	121
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	124
	<b>ANEXOS</b>	127

## **DEDICATORIA**

Esta tesis se la dedicamos a Dios quien supo guiarnos por el buen camino, darnos fuerzas para seguir adelante.

A nuestros padres por ser el pilar fundamental en nuestra formación, tanto académica como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Todo ese trabajo ha sido posible gracias a ellos.

## **AGRADECIMIENTO**

Expresamos nuestro agradecimiento de este trabajo de investigación a Dios por habernos iluminado en todo momento, a nuestra alma mater, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, a través de su Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por nuestra formación profesional.

A sí mismo debemos de agradecer al Mg. Vidal Sixto Aramburú Rojas, profesor asesor que contribuyó con su experiencia y orientación al desarrollo de la presente tesis. Nuestro reconocimiento a todos los docentes de la Facultad por sus consejos y recomendaciones por hacer realidad esta tesis de Pregrado.

## RESUMEN

La presente tesis fue elaborada en base a un estudio de investigación, para este estudio se cuenta con una muestra representativa de un mineral sulfurado de baja ley proveniente de la provincia de Casma del departamento de Ancash. La ley de cabeza es de 0.62 g/TM.

La caracterización de la muestra se realizó con el microscopio óptico polarizado, en la escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica de la UNMSM, los resultados de esta caracterización indicaron la presencia de las siguientes especies mineralógicas: Electrum, Esfalerita, Ilmenita, Pirita, Hematita, Goethita y gangas. Además en la muestra encontramos partículas entrelazadas referidas al oro, las cuales son: Electrum-Goethita, Electrum-Gangas, Electrum-Goethita-Gangas.

En base a los resultados de la caracterización se realizaron cuatro pruebas metalúrgicas de preconcentración gravimétrica-centrifugación en el concentrador Falcon, el resultado de la prueba más representativa fue con una granulometría de 67.80% -200 malla, obteniéndose una calidad del concentrado de 16.20 g/TM, con una recuperación de 57.04% y además de 41.60 como radio de concentración. Por último, se obtuvo una cabeza calculada de 0.68 g/TM.

Con el relave de la prueba más representativa de la preconcentración gravimétrica-centrifugación, se realizaron cuatro pruebas metalúrgicas de flotación, el resultado de la mejor prueba se obtuvo utilizando 74.10 g/TM de colector (AR-1208), obteniéndose una calidad del concentrado de 11.36 g/TM, 92.27% de recuperación y 88.11 de radio de concentración.

Los concentrados de la preconcentración gravimétrica-centrifugación y flotación se juntaron y se realizó la remolienda, obteniéndose una granulometría de 80.27% - 200 malla con una ley de cabeza de 15.78 gr/TM y con ello se realizaron cuatro pruebas metalúrgicas de cianuración en botella, a diferentes tiempos, el resultado de la mejor prueba se obtuvo a 72 hrs. de cianuración, obteniéndose 87.94% de recuperación de oro y con un consumo de cianuro de sodio de 1.65 Kg/TM

El proceso metalúrgico adecuado de acuerdo a los resultados de la investigación de la presente tesis, para la recuperación de oro de minerales sulfurados de baja ley en la provincia de Casma, fue una preconcentración con el concentrador Falcon, seguido de la flotación de los relaves de la preconcentración, finalmente se juntaron y se remolieron los concentrados de la preconcentración y flotación, para realizar el proceso de cianuración, obteniéndose una recuperación total de 87.94% de oro y un consumo de cianuro de sodio de 1.65 Kg/TM.



## NOMENCLATURA

p.p.m	Partes por millón
%	Porcentaje
Oz/TM	Onza por tonelada métrica
°C	Grados centígrados
Cal/g	Caloría por gramo
mm	Milímetro
L/S	Relación líquido-sólido
ml	Mililitro
A°	Radio iónico / Radio atómico
t/h	Toneladas por hora
m <sup>3</sup> /h	Metros cúbicos por hora
μ	Micra
G's	Fuerza de gravedad
VFD	Unidad de frecuencia variable
Kg/h	Kilogramos por hora
pH	Potencial de Hidrógeno
"	Pulgada.
US\$	Dólares Americanos.
KW	Kilowatts
hrs	Horas
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
Kg	Kilogramo
m	Metro
TM	Toneladas métricas
mg/l	Miligramo por litro
g	Gramo
cm <sup>2</sup>	Centímetro cuadrado
g/TM	Gramo por tonelada métrica
Psi	Libra por pulgada cuadrada
min	Minuto

g/lit	Gramo por litro
Km	Kilómetro
mm <sup>2</sup>	Milímetro cuadrado
mg/cm <sup>2</sup>	Miligramo por centímetro cuadrado
Eh	Potencial rédox
lb/Oz	Libra por onza
Bar	Unidad de presión
° , ' , ''	Latitud (grados, minutos, segundos)
mg/cm <sup>2</sup> /h	Miligramo por centímetro cuadrado por hora

## **LISTA DE TABLAS**

3.1	Coordenadas geográficas limitantes de Casma.	11
3.2	Ciudades limitantes de Casma.	11
3.3	Propiedades físicas del oro.	19
3.4	Producción nacional de oro por regiones.	27
3.5	Producción nacional de oro por empresa.	30
3.6	Producción internacional de oro por país.	32
3.7	Situación de la cartera de inversiones mineras 2015.	40
3.8	Cartera de inversiones 2015.	41
3.9	Cartera de inversiones mineras de proyectos auríferos y argentíferos.	42
3.10	Densidades de las menas más importantes.	45
3.11	Equipos de concentración gravimétrica.	46
3.12	Menas que presentan contenidos de oro.	70
3.13	Colectores para la flotación de oro.	76
3.14	Cantidad de oro disuelto en una hora.	80
3.15	Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro.	80
4.1	Minerales observados en la muestra.	95
4.2	Volúmenes y grados de liberación.	96
4.3	Volúmenes y grados de liberación de los minerales observados.	99
4.4	Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa.	100
5.1	Condiciones de preconcentración en el concentrador Falcon.	106

5.2	Balance metalúrgico del concentrador Falcon a 50.33% -200m.	107
5.3	Balance metalúrgico del concentrador Falcon a 59.45% -200m.	107
5.4	Balance metalúrgico del concentrador Falcon a 67.80% -200m.	108
5.5	Balance metalúrgico del concentrador Falcon a 73.58% -200m.	108
5.6	Condiciones de la prueba en flotación.	110
5.7	Balance metalúrgico de flotación consumo de 24.70 g/TM de AR-1208.	111
5.8	Balance metalúrgico de flotación consumo de 49.40 g/TM de AR-1208.	111
5.9	Balance metalúrgico de flotación consumo de 74.10 g/TM de AR-1208.	112
5.10	Balance metalúrgico de flotación consumo de 98.80 g/TM de AR-1208.	112
5.11	Condiciones de la prueba en cianuración.	114
5.12	Balance metalúrgico de cianuración a 12 hrs.	115
5.13	Balance metalúrgico de cianuración a 24 hrs.	115
5.14	Balance metalúrgico de cianuración a 48 hrs.	116
5.15	Balance metalúrgico de cianuración a 72 hrs.	116
6.1	Resultados de preconcentración en el concentrador Falcon.	118
6.2	Resultados de flotación.	119
6.3	Recuperación de oro en función al tiempo de cianuración.	120

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama general de los procesos involucrados en la investigación.	8
3.1	Producción nacional de oro por regiones (%).	28
3.2	Producción nacional de oro por empresa (%).	31
3.3	Producción internacional de oro por país (%).	33
3.4	Evolución anual de las exportaciones de oro y su cotización.	35
3.5	Destino de las exportaciones nacionales de oro.	35
3.6	Fluctuaciones en el precio del oro.	36
3.7	Cotización del Oro (US\$ por onza troy).	37
3.8	Sección transversal y longitudinal de un Jig.	47
3.9	Mesa vibratoria.	49
3.10	Espiral Humphrey.	51
3.11	Concentrador Falcon Semi Lote (SB).	58
3.12	Concentrador Falcon Continuos (C).	60
3.13	Concentrador Falcon Ultrafinos (UF).	62
3.14	Ángulo de contacto de las tres fases (aire-agua-sólido).	66
3.15	Diagrama de Pourbaix Au-CN-H <sub>2</sub> O.	87
4.1	Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs); partícula entrelazada de ilmenita (il) con la ganga (GGs). 200X.	101
4.2	Partícula entrelazada de electrum (el) con la ganga (GGs) y de ilmenita (il) con la ganga (GGs); partículas libres de gangas (GGs). 200X.	101

4.3	Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs); partícula entrelazada de ilmenita (il) con la ganga (GGs). 200X.	102
4.4	Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs); partícula entrelazada de la goethita (gt) con la ganga (GGs) y partículas libres de gangas (GGs). 200X.	102
4.5	Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs); partículas libres de gangas (GGs). 200X.	103
4.6	Partículas de gangas (GGs) y partículas entrelazadas de ilmenita (il) con la ganga (GGs). 200X.	103
4.7	Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs); partículas libres de gangas (GGs). 200X.	104
4.8	Partícula entrelazada de ilmenita (il) con la ganga (GGs). 200X.	104
4.9	Partícula libre de electrum (el), partícula entrelazada de ilmenita (il) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs); partículas libres de gangas (GGs). 200X.	105
4.10	Partícula entrelazada de electrum (el) con la ganga (GGs), de ilmenita (il) con la ganga (GGs); partículas libres de gangas (GGs y de hematita (hm). 200X.	105
5.1	Porcentaje de recuperación en función a la granulometría.	109
5.2	Porcentaje de recuperación en función a la dosificación del colector.	113
5.3	Porcentaje de recuperación en función al tiempo de cianuración.	117
5.4	Porcentaje de recuperación en función del consumo de cianuro.	117

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

La pródiga naturaleza que ha colmado al Perú de tantas riquezas, no ha sido menos generosa en dotar a este privilegiado país con numerosas minas o lavaderos del más precioso metal, que es el oro.

No hay región del Perú que no ofrezca algún depósito aurífero, el oro está sumamente repartido en toda la extensión del Perú; y si es verdad que hay lugares donde la cantidad de este metal contenida en terrenos auríferos es demasiado pequeña para pagar los costos de tratamientos de estos minerales, lo hay también otros en que pagan estos costos con un interés excesivamente alto.

Actualmente, el Perú es el sexto país con más reservas de oro del mundo, con un 5% del total, que equivalen a unas 2800 toneladas métricas, sin embargo, sólo producimos menos del 20% del enorme potencial que tenemos, y gran parte de ello se debe a la falta de inversión en exploración e investigación y tecnología que se requiere para explotar minerales de oro de baja ley, afectando principalmente a la pequeña y mediana minería. [8]

Es por ello que el presente trabajo surge por el interés de desarrollar procedimientos tecnológicos no contaminantes (concentración gravimétrica- centrífuga previo a la Flotación), que puedan servir para recuperar el oro en minerales de baja ley, que en este caso se estudia para los minerales sulfurados de la provincia de Casma.

Los concentradores gravimétricos – centrífugos, en un tiempo muy corto, han ganado gran aceptación para la recuperación gravimétrica de oro en minas grandes; frecuentemente en los circuitos de molienda para separar oro libre y evitar sobremolienda y antes del proceso de cianuración o flotación para recuperar el oro grueso y libre. [5]

También existen muchas aplicaciones en plantas industriales, en la minería aurífera aluvial. Otra aplicación especial para los

concentradores gravimétricos - centrífugos es la recuperación del oro como un producto secundario, por ejemplo, en canteras de grava. Todos los concentradores gravimétricos - centrífugos operan con el mismo principio: básicamente, un recipiente que rota efectuando la separación gravitacional de la carga en un campo centrífugo. [5]

Esta necesidad de usar la concentración gravimétrica - centrífuga, como una etapa de preconcentración, resulta porque la flotación del oro libre no es posible, fundamentalmente porque el oro es un elemento noble lo que significa que es metálico no reactivo químicamente, causando que la adsorción del colector en una superficie de oro puro no sea posible, ya que los colectores de flotación de sulfuro se absorben químicamente a las superficies del mineral de destino que son reactivos químicamente.[5]

En consecuencia la recuperación de oro de minerales sulfurados de baja ley, requiere una etapa de preconcentración, realizada en el concentrador gravimétrico - centrífugo, para recuperar todo el oro libre, seguido de la flotación, de los relaves de la preconcentración, en esta etapa se requiere un enfoque en la flotación de los metales base asociados ( mayormente plomo, cobre) y a menudo minerales de pirita , y por último se requiere la cianuración de los concentrados de la preconcentración y de flotación, con la finalidad de mejorar la calidad del concentrado y obtener el oro doré.

La investigación realizada hace posible encontrar el proceso metalúrgico adecuado, para minerales sulfurados de baja ley de oro; con lo cual será factible la explotación de estos yacimientos.



## **CAPITULO II**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

En el país existen muchos yacimientos de minerales sulfurados de tipo diseminado que son difíciles de ser explotados, por las características del yacimiento y la baja ley de oro que presentan.

Generalmente algunos estudios realizados presentan recuperaciones bajas, causando que varios yacimientos mineros que presentan este problema se encuentren abandonados, por no tener un proceso metalúrgico apropiado. [2]

Los procesos convencionales de recuperación de oro, tales como amalgamación y lixiviación no son aplicables directamente a este tipo de yacimientos, porque los resultados metalúrgicos no son aceptables, por la baja recuperación de oro, en consecuencia, no resulta económicamente rentables, es por ello que se requiere realizar estudios previos de investigación en los procesos metalúrgicos de: gravimetría-centrifugación, flotación y cianuración. [5]

En general los procesos convencionales de procesamiento de minerales oxidados y sulfurados, están orientados cuando las leyes de oro son relativamente altas. No existen muchos estudios de investigación referido a minerales sulfurados de baja ley a pesar de tener grandes depósitos de estos minerales, de ahí la necesidad de realizar estudios de investigación de procesos metalúrgicos para que la recuperación de oro sea factible. [8]

### **2.1.1 EL PROBLEMA FUNDAMENTAL**

El problema fundamental del presente trabajo de investigación radica en que los procesos convencionales como amalgamación y cianuración directa, no son aplicables a este tipo de minerales que presentan bajas leyes de oro, ya que sus características no son las apropiadas, es decir los resultados metalúrgicos no son aceptables, de ahí la necesidad de realizar trabajos de investigación para encontrar los procesos adecuados.

## **2.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El estudio de investigación de la presente tesis, se justifica porque aplicando procesos metalúrgicos de gravimetría-centrifugación, flotación y cianuración, se llega a recuperaciones aceptables, logrando así la explotación de oro en minerales sulfurados de baja ley, así mismo incrementar la rentabilidad en la explotación de yacimientos mineros, dentro de la minería aurífera peruana. Además, incentiva el desarrollo de los pueblos alejados teniendo en cuenta el cuidado del medioambiente.

### **2.2.1 JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICA**

La presente tesis se justifica tecnológicamente, ya que con el uso del equipo de concentración gravimétrica - centrífuga Falcon, previo a la flotación se logra recuperar el oro a partir de minerales sulfurados de baja ley en la provincia de Casma, empleando así procesos tecnológicos apropiados para la pequeña, mediana y gran minería.

Por lo expuesto, anteriormente, estamos dando la iniciativa para que se pueda viabilizar la recuperación de oro en minerales sulfurados de baja ley; por lo tanto, como el trabajo está orientado a ello entonces su desarrollo queda justificado.

## **2.3 OBJETIVOS**

Los objetivos en el presente trabajo de tesis son:

### **2.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Recuperar el oro de minerales sulfurados de baja ley provenientes de la provincia de Casma, mediante procesos metalúrgicos, combinados, de gravimetría-centrifugación, flotación y cianuración.

### **2.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar el proceso metalúrgico de concentración gravimétrica-centrifugación para concentrar oro en minerales sulfurados de baja ley de la provincia de Casma.
- Estudiar el proceso metalúrgico de flotación, para recuperar oro a partir de los relaves de la concentración gravimétrica – centrifugación, en la provincia de Casma.
- Estudiar el proceso metalúrgico de cianuración, para recuperar oro a partir de los concentrados de la concentración gravimétrica- centrifugación y flotación, en la provincia de Casma.

## **2.4 HIPÓTESIS Y VARIABLES**

### **2.4.1 HIPÓTESIS GENERAL**

Los procesos de pre concentración, flotación y cianuración, permitirán la recuperación de oro a partir de minerales sulfurados de baja ley de oro en la provincia de Casma.

### **2.4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS**

- El proceso adecuado de una preconcentración en la primera etapa, permitirá la recuperación de oro.
- El proceso de flotación de los relaves de la preconcentración, en la segunda etapa, también mejorará la recuperación de oro.

- El proceso de cianuración de los concentrados de la preconcentración y de la flotación, en la tercera etapa, mejorará significativamente la recuperación de oro.

### 2.4.3 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Las variables a considerarse en la **primera etapa**, que es la preconcentración (gravimetría – centrifugación) son:

**Variable independiente [24]:**

- Granulometría.

**Variable dependiente [24]:**

- Porcentaje de recuperación de oro.

**Variables intervinientes controladas [24]:**

- Fuerza de gravedad.
- Peso de muestra de mineral.
- Densidad de pulpa.
- Presión del flujo de agua.

Las variables a considerarse en la **segunda etapa**, que es el proceso de flotación son:

**Variable independiente [11]:**

- Dosificación del colector.

**Variable dependiente [11]:**

- Porcentaje de recuperación de oro.

**Variables intervinientes controladas [11]:**

- Consumo de reactivos.
- Velocidad de agitación.
- Tiempo de acondicionamiento de pulpa.
- Tiempo de flotación.
- Granulometría.
- Densidad de pulpa.
- pH de flotación.

Las variables a considerarse en la **tercera etapa**, de cianuración son:

**Variable independiente [25]:**

- Tiempo de cianuración.

**Variable dependiente [25]:**

- Porcentaje de recuperación de oro.

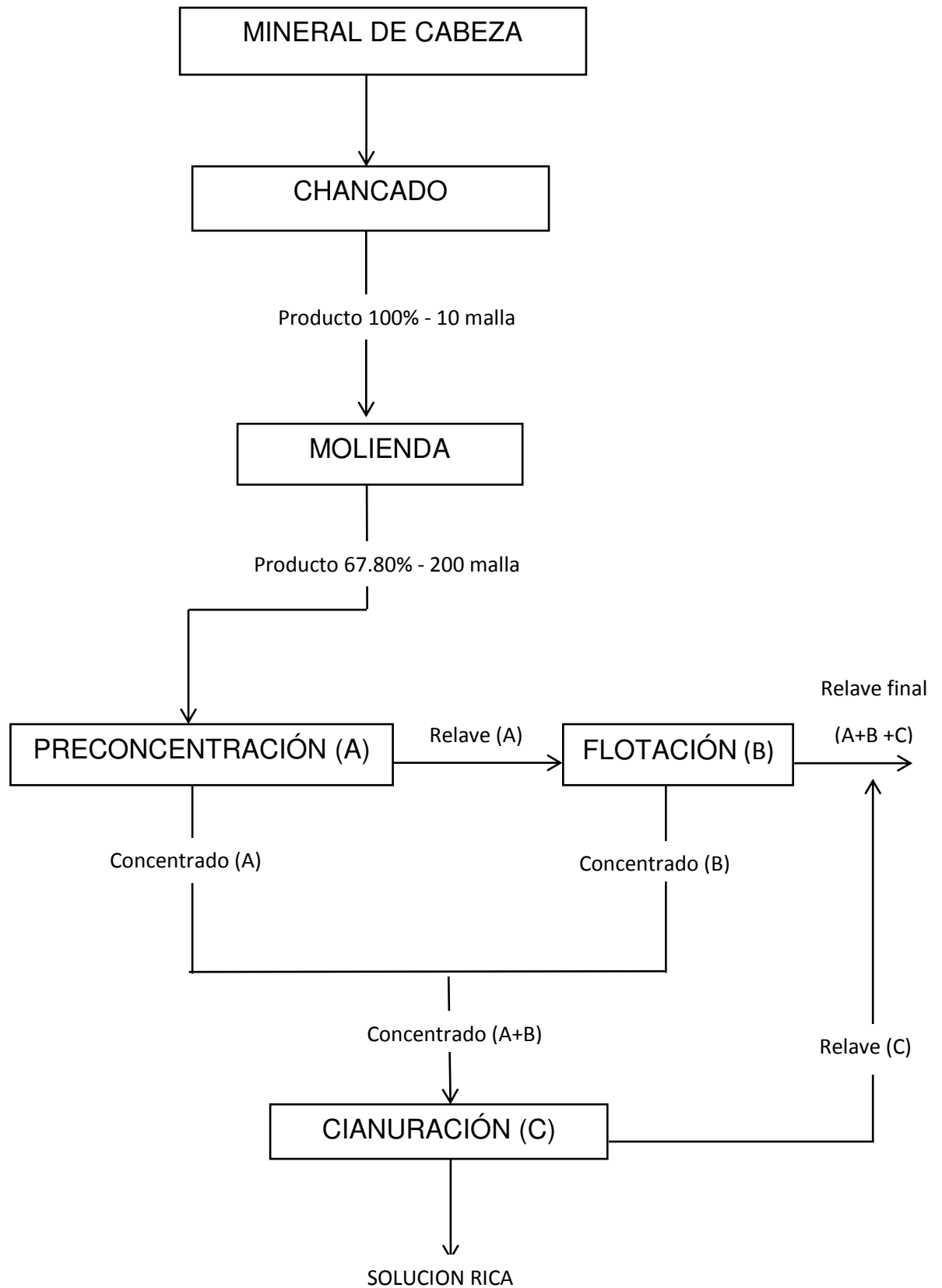
**Variables intervinientes controladas [25]:**

- pH de cianuración.
- Concentración de cianuro de sodio.
- Densidad de pulpa.
- Granulometría.

#### **2.4.4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

Para procesar e identificar la influencia de las variables en el proceso, se aplicó los balances metalúrgicos, tanto en la primera, segunda y tercera etapa, que es la preconcentración, la flotación y la cianuración, a fin de evaluar, interpretar y optimizar las relaciones entre las variables, independientes y dependientes en estudio.

**FIGURA 2.1** Diagrama general de los procesos involucrados en la investigación



\* Fuente: Elaboración propia (2017)

## CAPITULO III

### MARCO TEÓRICO

#### 3.1 ANTECEDENTES

Durante la época colonial se trabajaron algunos minerales de oro y plata de alta ley, dando la formación de grandes ciudades; desafortunadamente estas reservas se fueron agotando y esto dió lugar a la búsqueda de tecnología para el tratamiento de minerales de baja ley, en donde el oro se encontraba asociados a éstos. [1]

El oro ha tenido y tiene diferentes formas de incidencia en minerales sulfurados que van desde estar diseminados e integrados en minerales como plomo y cobre, óxidos metálicos especialmente como partículas diseminadas, y como oro en molienda libre o asociada con telururos. Donde el oro está íntimamente asociado con varios minerales de sulfuro especialmente sulfuro de hierro el cual incluye pirita, arsenopirita y pirrotita, la recuperación del oro por flotación depende de la recuperación de los minerales asociados, en este caso el oro sigue la recuperación de los minerales asociados de sulfuro. [1]

En el 2006 Carmen E. y Juan R. (2006) en su investigación *“Recuperación de Metales preciosos provenientes de Presa de Jales”* [2], presentada en la universidad Autónoma de San Luis Potosí – México. Manifiestan que el beneficio de minerales provenientes de presa de jales está presentando una importante generación de valor económico agregado en el procesamiento de minerales. El desarrollo de nuevos procesos de beneficio de minerales provenientes de presa de jales no sólo está enfocado al beneficio de minerales sulfuros de cobre, plomo, zinc y a los no sulfuros como la fluorita, sino también al procesamiento de minerales preciosos, tales como oro y plata por el método de flotación. Ya que la mayoría de los jales de diferentes minas, que han quedado como consecuencia de años de proceso, reportan en promedio valores de oro y plata del orden de 1.6 g Au/TM y

90 g Ag/TM, resultan económicamente atractivas para su procesamiento. [2]

Básicamente la investigación está basada en el estudio de concentración de minerales sulfurados de baja ley con contenidos de oro y plata por el método de flotación. [2]

Las pruebas metalúrgicas fueron diseñadas para el desarrollo de un esquema químico para el tratamiento de los minerales de Au y Ag provenientes de presa de Jales. Los estudios metalúrgicos se realizaron en las siguientes etapas:

1. Análisis de caracterización mineralógica.
2. Pruebas de molienda.
3. Pruebas de flotación.

Los productos de los análisis granulométricos con una mayor concentración de Au y Ag se prepararon para análisis de caracterización mineralógica los cuales fueron efectuados en microscopio electrónico de barrido (Phillips XL-30) utilizando electrones retrodispersos y un analizador EDX. Los resultados se obtienen en forma de imagen, espectro y composición de cada mineral encontrado.

En conclusión los resultados metalúrgicos realizados para la recuperación de metales preciosos, tales como el oro y la plata de minerales provenientes de presa de jales, muestran que es posible obtener leyes promedio de oro entre 37 y 83.5 g/TM y 2476 y 2548 g/TM de plata con recuperaciones promedio de 50.0% por el proceso de flotación. [2]

El tamaño de partícula juega un papel importante en los parámetros de la cinética de flotación, para lo cual se requiere al menos tener un 70% -200 malla para favorecer la conversión de mineral no flotable a flotable. Por otro lado, baja recuperación de plata se debe principalmente a la presencia de sulfosales que no responden fácilmente al proceso de flotación provocando una menor constante en la cinética de flotación. [2]



## 3.2 UBICACIÓN DE LA PROVINCIA DE CASMA

### 3.2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La ciudad de Casma se ubica en [20]:

Región : Ancash.

Provincia : Casma.

Distrito : Casma.

### 3.2.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La provincia de Casma, se encuentra localizada en la costa norte del país, al oeste de departamento de Ancash, abarcando regiones naturales costa y yunga. [20]

Sus puntos extremos se encuentran comprendidos entre las siguientes coordenadas [20]:

**TABLA 3.1** Coordenadas geográficas limitantes de Casma.

Orientación	Norte	Este	Sur	Oeste
Latitud Sur	09°12'06"	09°26'21"	09°47'36"	09°20'36"
Long. Oeste	78°14'40"	78°53'58"	78°13'40"	78°26'18"

\* Fuente: Cano, Oscar; Norabuena, Gerardo (2007)

**TABLA 3.2** Ciudades limitantes de Casma.

Orientación	
Norte	Cumbre del Cerro Santa Lucia límite con la provincia del Santa.
Este	Confluencia Quebrada Mushca con el Río Yaután límite con la provincia de Huaraz.
Sur	Punta Dos Amigos desembocadura del Río Seco límite con la provincia de Huarmey.
Oeste	Punta Playa Quita Calzón límite con la provincia del Santa.

\* Fuente: Cano, Oscar; Norabuena, Gerardo (2007)

### **3.3 ESTUDIO DEL ORO**

#### **3.3.1 EL PAPEL DEL ORO EN LA HISTORIA**

El oro ha tenido y tiene un doble interés a lo largo de la historia. Como metal valioso por sí mismo, ha sido medio de atesoramiento, soporte de economías personales o nacionales, de poderes políticos, o de inversión en forma de lingotes y monedas. Por otro lado, es un metal fácilmente utilizable para fabricar los objetos más diversos de ornamentación, culto religioso y joyas de diversas características que han sido manifestación de culturas a lo largo de la historia. [1]

Las primeras referencias sobre el oro se remontan más de 6000 años atrás en las riberas del río Nilo, donde sus habitantes comenzaron a utilizar como objeto decorativo sobre su cuerpo unas arenas doradas con propiedades mágicas, que no se alteraban con el paso del tiempo y que reflejaban la luz con destellos dorados, incluso en zonas sombrías. Hacia el año 1350 a.C., en la época del faraón Nemes, unificador de Egipto, se hablaba del “electrum”, aleación de oro y plata, que fija el valor del oro en términos relativos como dos veces y medio el valor de la plata. [1]

En Mesopotamia la cultura sumeria en paralelo a la civilización egipcia, también liga la posesión de oro con el poder, desarrollando a lo largo de su historia extracciones mineras al norte de Persia, hasta las del golfo de Aqaba, actualmente Yemen del Norte y antiguo reino de Saba. También en la cultura Micénica (1600-1200 a.C., orígenes de la antigua Grecia), se han encontrado en tumbas, máscaras de oro como la de Agamenón. El oro procedía de Egipto e incluso de la Península Ibérica, donde se han encontrado vestigios de aquellas épocas. El comercio de metales preciosos con origen en las minas de Tartesos (Andalucía) tuvo gran importancia en los inicios de las civilizaciones mediterráneas. De hecho, entre los años 750 y 580 a.C. los fenicios mantuvieron el monopolio en la distribución de los metales obtenidos en el sur de la Península Ibérica. En la civilización romana, la acuñación de monedas de oro (áureos) fue habitual basándose en el oro procedente de todo el

imperio, fundamentalmente de Hispania, Egipto y el Cáucaso. A lo largo de la historia existen multitud de referencias al uso y comercio del oro en las distintas civilizaciones precristianas, que se recogen más detalladamente en publicaciones especializadas. [1]

Podría considerarse que la utilización del oro como soporte económico se formaliza en la Edad Media, a través de los banqueros que reciben en depósito el oro de sus clientes y orfebres, emitiendo a cambio, recibos relacionados en término de pesos en oro, que servían de medio cobro-pago, sin un valor oficial predeterminado diferente al valor del propio oro en sí. El primer país que realiza una fijación moneda-oro, es Inglaterra en 1694, donde se establece una paridad sobre la base de la emisión del Soberano de oro con una relación 0,257 Oz/lb ó 3,891 lb/Oz. Durante las campañas napoleónicas, y la primera Guerra Mundial, la cotización del oro se suspende, pero el principio fundamental de mantenimiento de una paridad como medio para conseguir una estabilidad económica, que defendían los economistas clásicos, se mantiene. En definitiva, se estableció lo que en economía se conoce como Patrón Oro, que es un sistema monetario que permite convertir todos los medios de pago legales y cambiarlos por cantidades predeterminadas de oro. La adopción generalizada del Patrón Oro durante la segunda mitad del siglo XIX fue en gran parte debido a la Revolución Industrial que acarreo un enorme aumento de la producción de bienes y amplió la base del comercio mundial. Los países que adoptaron el Patrón Oro buscaban facilitar la consecución de transacciones financieras y comerciales internacionales, así como conseguir la estabilidad monetaria del país y los tipos de cambio. El primer lugar donde se adoptó el Patrón Oro fue en Gran Bretaña en 1816, en 1873 se extendió a Estados Unidos y en 1900 casi todos los demás países admitieron este sistema. Salvo algunas excepciones, el sistema del Patrón Oro se mantuvo hasta el crack de Wall Street de 1929 y la posterior gran depresión. Entre 1931 y 1934 los gobiernos de todos los países consideraron imprescindible o necesario abandonar el Patrón Oro. Esta Política se debía, en parte, a la creencia de que se

podían aumentar las exportaciones de un país mediante la devaluación de su moneda modificando el tipo de cambio. Sin embargo, con el tiempo las ventajas que esta política tenía desaparecieron a medida que los demás países abandonaban a su vez el Patrón Oro. El papel del oro perdió importancia cuando el gobierno estadounidense, en 1975, comenzó a vender parte de sus reservas de este metal en el mercado libre, provocando que el oro pasara a ser un bien en lugar de un patrón dentro del sistema monetario internacional. A finales de la década de los 70, las monedas principales dejaron de ser convertibles en oro. [1]

### **3.3.2 EL ORO EN LA NATURALEZA**

El ciclo geoquímico del oro se ha dividido por etapas, en el ambiente hipogéno este metal es enriquecido por una fase magmática, etapa inicial generada por fusión parcial en zonas profundas continentales de rocas que contienen 0.005 p.p.m de oro, que al ser activadas por la presencia de agua, presión y temperatura elevada, se cristalizan formando la corteza terrestre donde el oro se distribuye con un promedio de 0.004 p.p.m. [3]

Al disminuir la temperatura y presión, el oro tiende a concentrarse asociado al ensamble cuarzo – pirita – arsenopirita con valores entre cero a 45 p.p.m. en oro, debido al efecto reductor del  $\text{Fe}^{-2}$  y  $\text{As}^{-3}$ , en menos proporción lo hacen los sulfuros de metales básicos. [3]

Frente a los agentes del intemperismo: agua, oxígeno, temperatura,  $\text{CO}_2$  y materia orgánica que actúan sobre las sulfosales y sulfuros que contienen oro y plata estos se solubilizan parcialmente, dejando  $\text{Au}^0$  y  $\text{Ag}^0$  libre en medio ácido (pH 2-4); los cuales al actuar en medios carbonatados, aumentan el pH y Eh, logrando oxidar y precipitar, el  $\text{Fe}^{-2}$ , que actúa sobre la  $\text{Ag}^+$ , produce  $\text{Ag}^0$  y enriquecimiento del oro cerca o en la superficie ligado a ensambles de limonita, hematita, goetita, calizas, pizarras, algo similar ocurre con los coloides negativos de manganeso que colectan plata.[3]

### 3.3.3 MINERALES AURÍFEROS PRINCIPALES

- **Elementos nativos y aleaciones naturales**

Oro nativo

Oro argentífero (electrum) (Au, Ag)

Oro cuprífero (cuproaururo) (Ag, Cu)

Oro paladinífero (porpezita) (Au, Pd)

Oro platinífero (Au, Pt)

Amalgama de oro ( $\text{Au}_2\text{Hg}_3$ )

- **Sulfuros**

Uylembogaardtita ( $\text{Ag}_3\text{AuS}_2$ )

- **Teluros**

Calaverita ( $\text{Au, Te}_2$ )

Krennerita ( $\text{Au, Ag, Te}_2$ )

Petzita ( $\text{Ag}_3, \text{Au, Te}_2$ )

Sylvanita ( $\text{Au, Ag, Te}$ )

Kostovita ( $\text{Au, Cu, Te}_4$ )

- **Antimoniuro**

Aurostibita ( $\text{Au, Sb}_2$ )

#### ***Oro nativo***

El oro nativo generalmente contiene Ag, Cu y Fe y desde trazas hasta menores proporciones de algunos de los siguientes elementos: Li, Na, K, Mg, Ca, Zn, Cd, Hg, Bi, Al, Ge, Pb, Ti, As, Sb, Te, Mn, Pt y tierras raras. El oro nativo de los placeres generalmente contiene menores proporciones de plata que los correspondientes yacimientos primarios y contiene mayor pureza, debido a que la plata y otros elementos han sido parcialmente lixiviados. [3]

Un estudio de minerales auríferos de veta y placeres demostró que de 24 elementos detectados (incluye el oro) los elementos comunes para todas las muestras eran Ag, Cu, Fe y Ti, además de éstos en las muestras de veta eran: Pb, Pd, Bi, V, Ni, Co y en las muestras de placeres eran Ti, Zr, La y Cr. [3]

#### *Formas de oro nativo:*

- Esponja: Deslustrado
- Escama: Laminilla
- Pepitas: Granos
- Hojuelas: Hoja, lóbulo

#### ***Electrum***

La mayor parte de la plata en el oro se encuentra como constituyente de la red cristalina, existe un amplio rango sustitucional que va desde el oro nativo a través del oro argentífero (electrum), plata aurífera (kustetita) hasta plata nativa. Electrum se denomina al oro que contiene entre 2% a 55% de Ag, en el Perú es muy común por los yacimientos de : Millotingo, Colqui, San Juan de Lucanas. [3]

#### ***Minerales asociados al oro***

El oro es un microconstituyente común en un gran número de sulfuros y sulfuarseniuros, se concentra en las especies de Cu, Ag y Sb, en la pirita y arsenopirita, los sulfuros de Pb y Zn y las sulfosales normalmente no contienen altos valores de oro.

En la galena el oro ocurre como finas inclusiones de oro nativo, la chalcocita, bornita y calcopirita ocasionalmente tienen valores significativos de oro. [3]

En la pirita y arsenopirita el oro ocurre [3]:

1. Como solución sólida (oro invisible) se presenta en dos formas:

*Catiónica*; en la cual el oro sustituye al Fe de la pirita y arsenopirita

*Aniónica*; en la cual el oro reemplaza átomos de As de arsenopirita, los radios atómicos del oro y arsénico son muy similares (Au=1.44; As=1.39)

2. Oro visible como ampollas de exolución, inclusiones, microvenillas, relleno de intersticios, reemplazamiento y microhalos.

La limonita y el wad tienden a ser los portadores más comunes de oro, especialmente cuando estos óxidos ocurren muy próximos a yacimientos auríferos, se ha encontrado hasta 1.3 Oz/TM de oro y más de 100 Oz/TM de Ag en el wad, grafito, carbón amorfo y materiales carbonosos que son referidos como carbón, se encuentran frecuentemente en depósitos de oro, el cuarzo es el mineral más común de todos los yacimientos de oro y son de tipo incoloro o blanco lechoso, negro, gris, moteado de negro y blanco, pardo, rojo, amatista y verde. [3]

Generalmente la pirita después del cuarzo es el sulfuro más importante en los yacimientos auríferos. Hematita, magnetita e ilmenita comúnmente se encuentra en los placeres auríferos. [3]

#### ***Telururos de oro***

Son los únicos otros minerales de oro, aparte del oro metálico que tiene importancia económica, generalmente se encuentran asociados con oro nativo y con sulfuros. A estos minerales pertenece la calaverita ( $\text{AuTe}_2$ ) y krennerita ( $(\text{Au.Ag}) \text{Te}_2$ ), los cuales tienen alrededor de 40% de oro, y la silvanita ( $\text{AgAuTe}_4$ ), que también contiene plata y presenta alrededor de 25% de oro. [3]

#### ***Oro en otros minerales***

Existen otros minerales que también contienen oro como la auroestibina ( $\text{AuSb}_2$ ), oro con cobre porfirítico y como la kostovita ( $\text{CuAuTe}_4$ ). [3]

### **3.3.4 TIPOS DE YACIMIENTOS AURÍFEROS**

#### ***Vetas y filones de cuarzo aurífero.***

Las vetas de cuarzo con mineralización de oro y otros metales de menor relevancia ocurren en dos unidades geológicas principales [6]:

1. En el Batolito Occidental Andino especialmente en una parte media (área de Nazca - Ocoña).

2. En el paquete de rocas paleozoicas y rocas intrusivas vecinas que constituyen la Cordillera Oriental.

### ***Depósitos Epitermales***

Son las vetas hidrotermales de cuarzo, carbonatos, baritina y fluorita, que contienen oro nativo y telururos de oro y cantidades variables de plata. Constituyen vetas emplazadas en espacios abiertos y la gran parte se encuentra en rocas volcánicas muy alteradas de edad terciaria. [6]

### ***Placeres***

Compuestos de arena no consolidadas o semi-consolidadas y de gravas, las que contienen muy pequeñas cantidades de oro nativo y otros minerales pesados (magnetita). La mayor parte son depósitos fluvioglaciales y glaciales; ocurren a lo largo de valles y cauces actuales o terrazas de flujos preexistentes. [6]

### ***Placeres Fósiles***

Estos son depósitos formados en épocas geológicas muy antiguas. Todos los ejemplos conocidos son pre-cambrianos y han sido litificados hasta convertirse en conglomerados formando parte del basamento, están compuestos por cuarzo, pirita y minerales micáceos. [6]

### ***Depósitos Diseminados de Oro***

Los yacimientos de este tipo, corresponden al mineral en estudio de la presente tesis. Consisten en diseminados de oro en granos muy finos en calizas, dolomitas y limosas. El oro que mayormente es sub-microscópico, está acompañado de sílice, pirita y otros sulfuros. [6]

### ***Oro como Subproducto.***

Donde el oro es el constituyente menor común de la mena y puede ser recuperado durante los procesos de fundición y refinación de los concentrados de los metales base. A pesar de que el contenido de oro en estas menas es baja, la producción es significativa debido a los altos tonelajes de mineral que se tratan. [6]



### 3.3.5 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ORO [18]

**TABLA 3.3** Propiedades físicas del oro

PROPIEDADES	ORO
Símbolo químico	Au
Color	Amarillo
Peso atómico	197
Número atómico	79
Estado de oxidación	3.1
Densidad específica	19.3
Temperatura de fusión C°	1063
Temperatura de ebullición C°	2530
Temperatura de vaporización C°	2808
Calor de fusión, cal/gr.	16.3
Dureza (Mohs)	2.5
Radio atómico, A°	1.46
Radio iónico. A°	1.37
Potencial normal, voltios	1.498
Resistencia Eléctrica, MHm.	2.25
Electronegatividad	2.4

\* Fuente : Misari Ch., Fidel Sergio; Franco Jiménez, Juan Antonio (1993)

### **3.3.6 PROPIEDADES QUÍMICAS [18]**

- Es fácilmente soluble en agua regia o en otras mezclas que desprenden cloro. También lo disuelve el yodo en estado nascente y los cianuros.
- No lo atacan el ácido clorhídrico ni tampoco el ácido nítrico solo.
- No lo atacan los álcalis fundidos.
- El ácido sulfúrico lo ataca por encima de los 300 °C.
- El oro se alea con gran facilidad con el mercurio (amalgama de mercurio). Calentando cuidadosamente la amalgama formada, se evapora el mercurio y queda el oro en forma esponjosa.
- El oro es el más "no-reactivo" de todos los metales, es benigno en todos los ambientes naturales e industriales. El oro nunca reacciona con oxígeno o sea difícilmente se oxidará o se empañará.

### **3.3.7 PROPIEDADES MECÁNICAS [18]**

El oro es un metal maleable y dúctil, en forma de lingote se le puede trocear, modelar y martillar en frío; en forma de lámina, puede no sobrepasar el espesor de un quinceavo de micra, es decir la décima quinta parte de una milésima de milímetro (0.0001mm), las cuales dejan pasar la luz tomando un color verde azulado, pero con la luz reflejada presenta su color característico. Con una onza de oro, es decir con aproximadamente 30 g, se puede cubrir una superficie de 30 m<sup>2</sup>. En la forma de hilo el oro se puede estirar hasta alcanzar longitudes increíbles, una onza de metal alcanzaría más de 90 Km. El oro es muy resistente, su límite de elasticidad es de 4 Kg/mm<sup>2</sup>, su carga de ruptura alcanza los 13 Kg/mm<sup>2</sup>. Es de fácil soldadura autógena, buen conductor eléctrico y buen aislante del calor y del frío.

### 3.3.8 UTILIDADES DEL ORO

Encontramos en la demanda del oro tres fuentes [7]:

- Joyería
- Inversión
- Tecnología

#### ***Joyería.***

La demanda por joyería es el componente con mayor porcentaje debido a su volumen, alrededor de un 59%, aunque hay que destacar que estos últimos años se ha reducido el consumo de joyas debido la crisis financiera internacional. [7]

La India es el principal mercado de joyas a nivel mundial debido a la cultura y tradición que mantiene este país. El oro es visto como un regalo de los dioses, proporcionando la seguridad social, un símbolo de riqueza y prosperidad. China es el mercado que tiene un crecimiento rápido de joyas de oro en el mundo. Los consumidores chinos quieren un nivel de pureza en las joyas de oro, aproximadamente un 80%. Estados Unidos es el mercado más importante en cuanto al consumo de joyas de oro. [7]

#### ***Inversión.***

Las principales razones de por qué invertir en oro son:

##### ***Diversificación de la cartera.***

La mayoría de las carteras de inversión incorporan acciones y bonos, que son activos financieros muy tradicionales. El hecho de diversificar nuestra cartera nos puede ofrecer mayor protección contra las fluctuaciones en el valor de cualquier activo. Es decir, que si una cartera contiene oro, normalmente, es más robusta y menos volátil. [7]

##### ***Gestión del riesgo.***

Sabemos que el oro es un activo menos volátil que el resto de los productos financieros. Es decir, que activos con baja volatilidad nos

ayuda a reducir el riesgo global de nuestra cartera y también nos ayuda a gestionar el riesgo con mayor eficacia mediante la protección contra los eventos negativos poco frecuentes. [7]

#### *Moneda de cobertura.*

Se utiliza el oro como una cobertura contra las fluctuaciones de las monedas, en particular, el dólar americano. Por lo que una caída en el dólar produce un aumento en el precio del oro, es decir, que es uno de los activos más eficaces en la protección contra la debilidad del dólar. [7]

La inversión en oro puede tomar muchas formas, como:

#### *Lingotes y monedas*

La compra de lingotes es el medio más rentable de poseer oro. El valor de mercado de las monedas de oro es determinado por el contenido de oro que lleva dicha moneda más un margen de beneficio que varía entre las monedas y los comerciantes, entre un 4% y un 8% aproximadamente. Por tanto, la compra de lingotes y monedas de oro es muy popular entre los inversionistas pequeños y medianos. [7]

#### *Acciones*

La mayoría de las carteras de inversión mantienen activos financieros como por ejemplo acciones y bonos. Tener una cartera diversificada da mayor protección, es decir, que por lo general tener una cartera que contiene oro es menos volátil y más resistente. Es satisfactorio acceder al mercado del oro a través de la compra de acciones de empresas mineras de oro, ya que una acción de oro no sólo depende del precio del futuro del oro, sino que también depende de la visión futura de las empresas. Las acciones mineras dan oportunidades de revalorización del capital y de ganar dividendos. Generalmente, si la cotización del oro aumenta, los dividendos y los beneficios subirán. [7]

### *Futuros*

En los contratos de futuros de oro, hay el compromiso de comprar o vender una cantidad determinada, en una fecha específica y a un precio que se haya acordado de antemano. Por tanto, los inversores se aprovecharán de su inversión significativamente obteniendo increíbles beneficios, pero en el caso de que haya un movimiento opuesto en el precio del oro alcanzarían pérdidas. [7]

### *Fondos de Inversión*

Son productos financieros que proporcionan a los inversores la evolución de los precios de los lingotes de oro. También, ofrece a los inversores poder participar en el mercado de los lingotes de oro sin la necesidad de tomar la entrega física del oro. Estos fondos se negocian en una diversidad de bolsas de valores en el mundo. La mayoría de los fondos de inversión ofrecen programas de inversión en oro. Con estos fondos, los inversores compran el riesgo de mercado, en lugar del riesgo específico. [7]

### ***Tecnología.***

Es el elemento con menor porcentaje de la demanda. Aproximadamente, el 12% de la demanda de oro proviene de las aplicaciones tecnológicas. Las investigaciones realizadas durante la última década han descubierto una serie de aplicaciones nuevas para el oro. Esta fabricación se produce en países como Asia, Europa y América del Norte. El oro proporciona una excelente utilidad debido a sus propiedades técnicas, además de ser manipulado físicamente ya que es maleable y dúctil. El oro es utilizado para [7]:

### *Electrónica*

Los fabricantes de este sector utilizan el oro para crear componentes para sistemas informáticos, teléfonos y televisores. Millones de máquinas se fabrican cada año y el oro juega un papel muy importante en muchos de sus componentes. El uso más importante del oro es, en el caso de la electrónica, un alambre fino que conecta a los circuitos de

los semiconductores o al cerebro del ordenador. El oro es esencial en los circuitos de todos los equipos debido a su conductividad eléctrica y porque no se degradan con el paso del tiempo. [7]

### *Medicina*

El oro demuestra ser biocompatible dentro del cuerpo humano, lo que resulta ser en un gran porcentaje de aplicaciones directas de oro como material médico. El oro es resistente a las bacterias y puede ser utilizado para implantes donde existe un alto riesgo de infección. Actualmente, muchas aplicaciones biomédicas incluyen el uso de alambres de oro en los marcapasos e implantes para la lesión del nervio facial. Además, está siendo investigado para tratamientos de otras enfermedades como es el caso del cáncer. [7]

### *Espacio*

Durante muchos años, el oro ha sido un componente clave para la tecnología espacial y la exploración. Su eficacia como reflector de calor y la radiación infrarroja ha sido invaluable en numerosas empresas de la NASA. [7]

### *Láser*

En este caso, el uso del oro en los láseres es para poder tener un control del foco. Esto nos lleva a tener que darle mucha importancia a la medicina, ya que ayuda a la destrucción puntual de células cancerosas, a la cirugía de los ojos y al tejido cerebral. También, estos láseres son utilizados para rejuvenecer los tejidos de la piel que han sido dañados por quemaduras o lesiones. [7]

### *Ingeniería*

En este sector, el oro proporciona buena resistencia en muchos casos, como en la oxidación o la corrosión. [7]

Los nuevos avances en la tecnología, en cuanto a la demanda de oro, es posible que sea para obtener más avances en nuevos diagnósticos médicos, la purificación del agua y las células solares. [7]

## **3.4 PRODUCCIÓN Y COMERCIO DEL ORO**

### **3.4.1 PRODUCCIÓN NACIONAL DE ORO POR REGIONES**

En el caso del oro, según reportadas por el Ministerio de Energía y Minas (2015-2016), la producción nacional alcanzó un volumen de 4.5 millones de onzas finas que representaron solo un incremento de 3.52% respecto al año previo. Menor rendimiento presentaron en las regiones que centran el 60.71% de la producción nacional como son La Libertad y Cajamarca. [8]

Esta situación fue amortiguada por pequeños incrementos en regiones como Ancash, Madre de Dios y Cusco (32.2%, 58.35%, 54.06%; respectivamente) pero por su menor peso en la participación no tuvieron un mayor efecto en la producción aurífera nacional. [8]

El Perú, sin embargo, subió una posición en el ranking mundial de producción aurífera debido a un menor rendimiento de Sudáfrica que retrocedió y permitió ceder al Perú el sexto lugar, manteniéndonos como primer productor latinoamericano del precioso metal. En tanto, según cifras preliminares de las reservas cuantificadas en el mundo, ubican al Perú como el sexto país con mayores reservas del precioso metal y a nivel latinoamericano en el primer lugar al contener casi el 5% del total de reservas globales. El consumo mundial del oro, disminuyó con la caída del mercado de valores de China en la primera mitad de 2015, es por ello que la inversión en lingotes de oro, monedas y joyas, no es alentador. El oro almacenado por los fondos negociados en bolsas físicas también disminuyó durante los últimos 3 años, aunque los bancos centrales, aprovechando los precios más bajos, aumentaron su compra de lingotes de oro. [8]

A nivel local, la distribución de la producción aurífera en el año 2015, permite indicar la consolidación de la región de La Libertad como líder en extracción; aportando el 31.89% de la producción nacional, con un volumen de 1.5 millones de onzas finas, habiendo incrementado su producción en 0.13%. En tanto, la región Cajamarca reportó un

volumen de 1.3 millones de onzas finas durante el año (aportando el 28.82%); esta región reportó una tasa declinante en su producción que al cierre del año fue de -5.14% y esto fue producto de los continuos conflictos sociales que se registraron en esa región. Por su parte, la región Arequipa cooperó en la producción aurífera en un 9.43%, por la masa obtenida de mineral y un volumen de concentrados en 439,901 onzas finas, declinando su producción en -2.71%. [8]

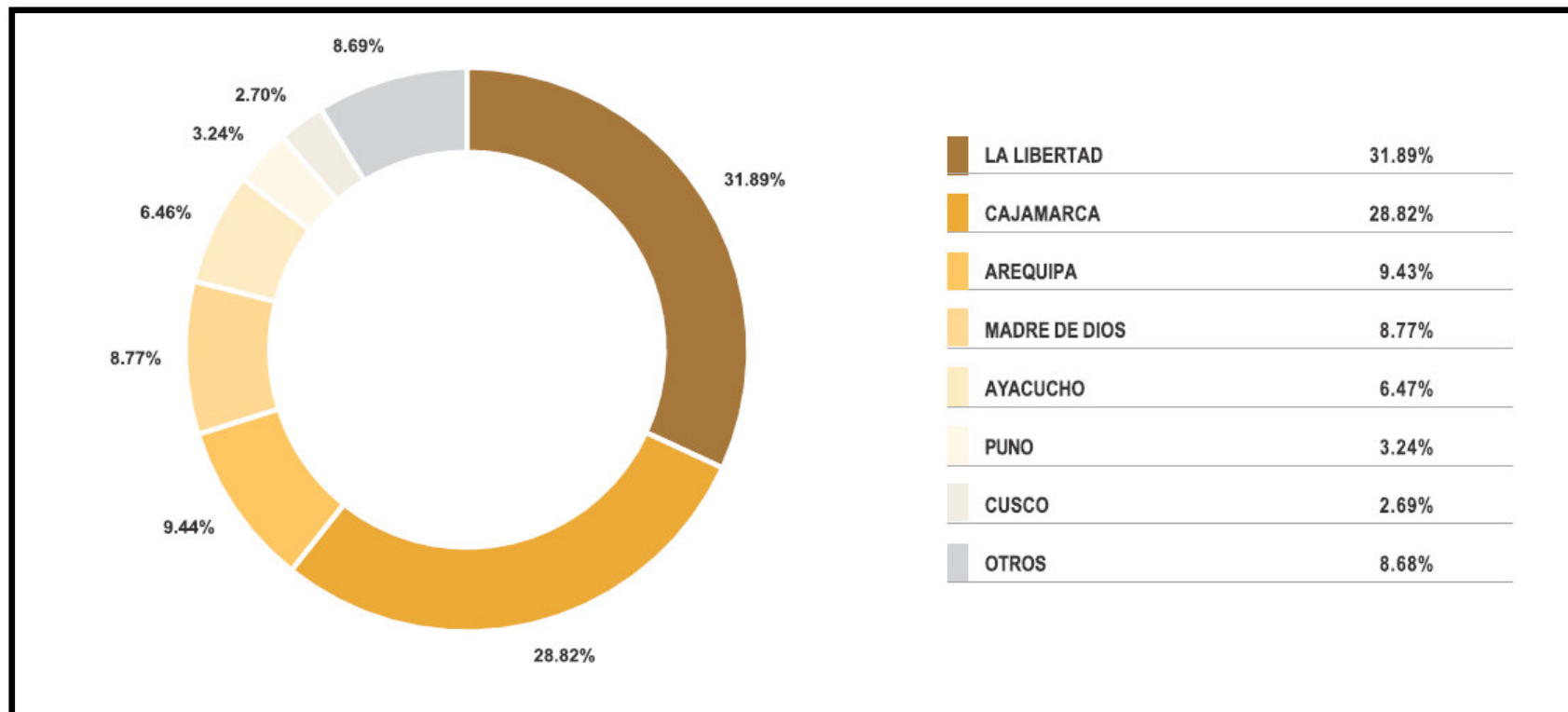


**TABLA 3.4** Producción nacional de oro por regiones

2006-2015 : PRODUCCIÓN NACIONAL DE ORO POR REGIONES (MILES DE ONZAS FINAS) GOLD DOMESTIC PRODUTOR BY REGIONS (THOUSANDS OF FINE OUNCES)										
REGION	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>TOTAL</b>	<b>6,486</b>	<b>5,443</b>	<b>5,772</b>	<b>5,912</b>	<b>5,275</b>	<b>5,344</b>	<b>5,186</b>	<b>5,023</b>	<b>4,504</b>	<b>4,663</b>
LA LIBERTAD	1,798	1,735	1,838	1,694	1,545	1,509	1,681	1,532	1,485	1,487
CAJAMARCA	2,614	1,567	1,844	2,202	1,661	1,641	1,776	1,464	1,417	1,344
AREQUIPA	536	567	519	546	562	728	531	443	452	440
MADRE DE DIOS	511	529	540	558	614	559	390	519	258	409
AYACUCHO	71	98	139	151	173	204	211	324	324	301
PUNO	26	70	106	107	90	108	125	158	161	151
CUSCO	40	39	37	38	76	158	81	119	81	126
TACNA	3	2	2	3	3	3	2	120	108	121
ANCASH	512	522	404	276	198	97	113	97	18	75
APURIMAC	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	73.9
MOQUEGUA	190	170	153	176	213	192	183	163	114	51
PASCO	60	50	68	69	45	48	35	29	34	35
JUNIN	-	-	50	34	33	25	27	25	24	24
LIMA	16	17	22	19	18	38	16	16	16	14
ICA	-	-	-	-	-	-	-	7	7.8	9.4
HUANCAVELICA	109	77	50	39	44	34	15	7	3.7	1.4

\* Fuente: Ministerio de Energía y Minas del Perú (2015)

**FIGURA 3.1** Producción nacional de oro por regiones (%).



\* Fuente: Ministerio de Energía y Minas del Perú (2015)

### **3.4.2 PRODUCCIÓN NACIONAL POR COMPAÑÍA**

En relación con la producción a nivel de las principales compañías mineras, podemos apreciar que los resultados del año 2015 posicionaron nuevamente a Minera Yanacocha S.R.L como primer productor de oro con una participación de 19.10% de la producción nacional y un volumen de 890,460 onzas finas, pero tuvo una tasa declinante de -8.19% respecto al año previo. [8]

Por su parte, Minera Barrick Misquichilca S.A.C aportó el 13.18% al obtener 614,341 onzas finas de este metal, incrementando 2.64% su rendimiento del año anterior, por la mayor eficiencia en su unidad Acumulación Alto Chicama (La Libertad). [8]

La tercera posición corresponde a Consorcio Minero Horizonte S.A con un volumen de extracción de 252,202 onzas finas (aportó el 5.41%) y gestionó una tasa favorable de 5.41%, por las operaciones de sus unidades localizadas en la región La Libertad. [8]

Finalmente, el reporte de la producción estimada de las actividades mineras en vías de formalización en la localidad de Madre de Dios al mes de Diciembre del 2015 representó el 8.39% de la producción nacional y tuvo un 54% como tasa interanual de crecimiento. [8]

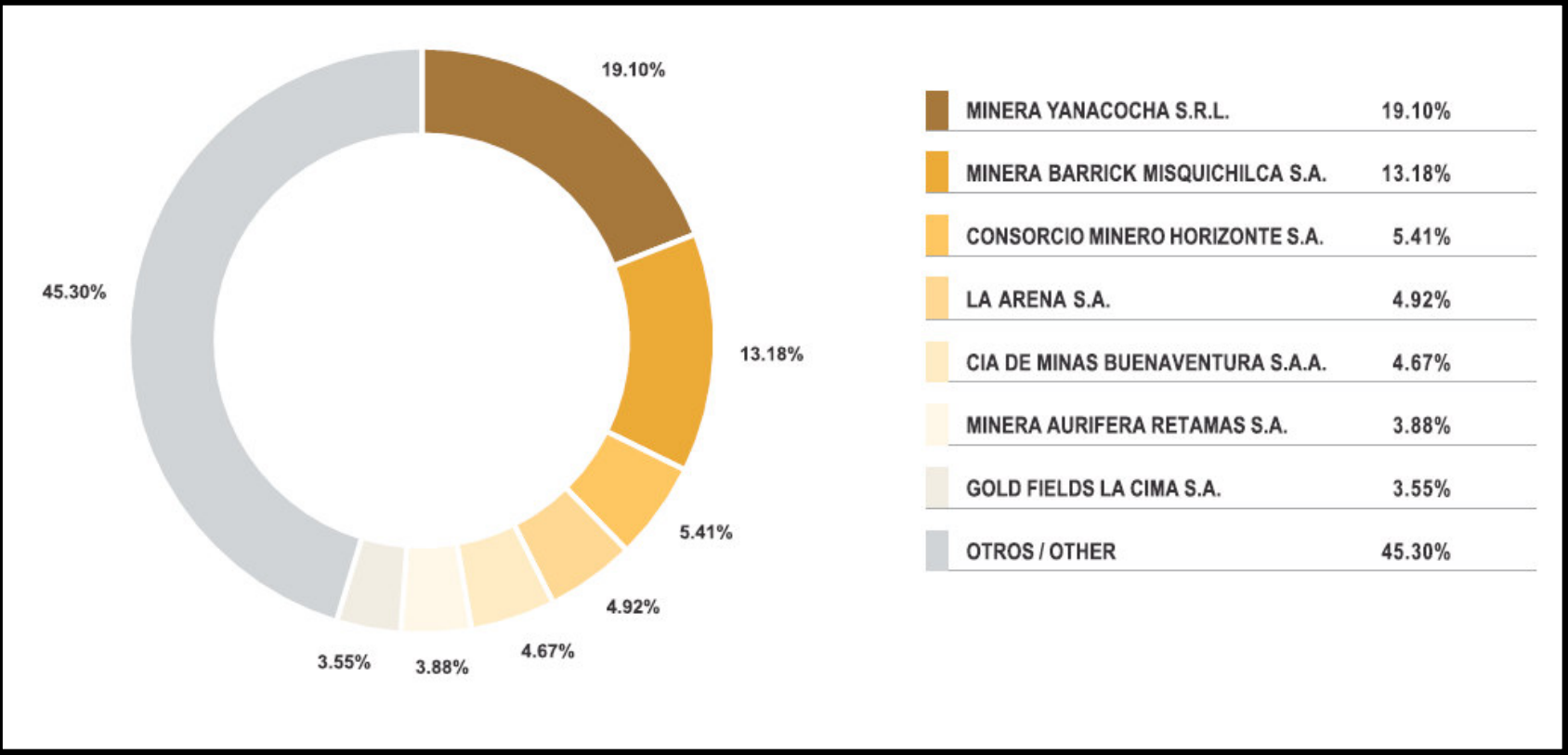
La producción de oro aumentó en 5.5% entre marzo del 2015 y el mismo mes del 2016. Sin embargo se observa una caída respecto del mes de febrero del 2016. En marzo del 2016, Yanacocha lideró la producción de oro, seguido de Barrick y Horizonte. [8]

**TABLA 3.5** Producción nacional de oro por empresa

2006-2015 : PRODUCCIÓN NACIONAL DE ORO POR EMPRESA (MILES DE ONZAS FINAS) GOLD DOMESTIC PRODUTOR BY COMPANY (THOUSANDS OF FINE OUNCES)										
EMPRESA/COMPANY	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>TOTAL</b>	<b>6,486</b>	<b>5,443</b>	<b>5,772</b>	<b>5,912</b>	<b>5,275</b>	<b>5,344</b>	<b>5,186</b>	<b>5,023</b>	<b>4,504</b>	<b>4,663</b>
MINERA YANACOCHA S.R.L	2,612	1,564	1,807	2,058	1,462	1,293	1,346	1,017	970	890
MINERA BARRICK MISQUICHILCA S.A.	1,668	1,606	1,575	1,278	998	915	865	701	599	614
CONSORCIO MINERO HORIZONTE S.A.	162	156	166	161	193	190	184	199	247	252
LA ARENA S.A.	-	-	-	-	-	53	200	211	220	229
COMPAÑIA DE MINAS BUENAVENTURA S.A.A.	253	365	363	359	385	342	274	249	244	218
MINERA AURIFERA RETAMAS S.A.	159	130	139	153	157	166	176	177	181	181
GOLD FIELDS LA CIMA S.A.	-	-	35	143	160	168	177	166	157	166
COMPAÑIA MINERA PODEROSA S.A.	77	78	101	106	116	114	127	147	156	161
COMPAÑIA MINERA COIMOLACHE S.A.	-	-	-	-	-	44	139	143	145	154
ARUNTANI S.A.C.	207	171	148	172	209	199	178	158	169	152
MINERA LA ZANJA S.R.L.	-	-	-	-	38	134	112	137	144	133
COMPAÑIA MINERA ANTAPACCAY S.A.	40	39	37	38	30	34	19	79	69	123
MINSUR S.A.	-	-	-	-	-	-	-	117	106	118
COMPAÑIA MINERA ARES S.A.C.	196	186	99	74	58	47	45	40	51	93
MINERA LAYTARUMA S.A.	55	67	82	90	98	108	106	95	100	90
ANABI S.A.C.	0	37	88	87	67	69	91	108	56	74
MINERA VETA DORADA S.A.C.	-	-	-	-	20	45	61	77	67	68
COMPAÑIA MINERA CARAVELI S.A.C.	37	34	31	29	32	31	35	42	45	44
OTROS	512	484	564	611	642	669	684	665	526	511
MADRE DE DIOS	508	526	537	553	610	723	367	495	253	391

\* Fuente: Ministerio de Energía y Minas del Perú (2015)

**FIGURA 3.2** Producción nacional de oro por empresa (%).



\* Fuente: Ministerio de Energía y Minas del Perú (2015)

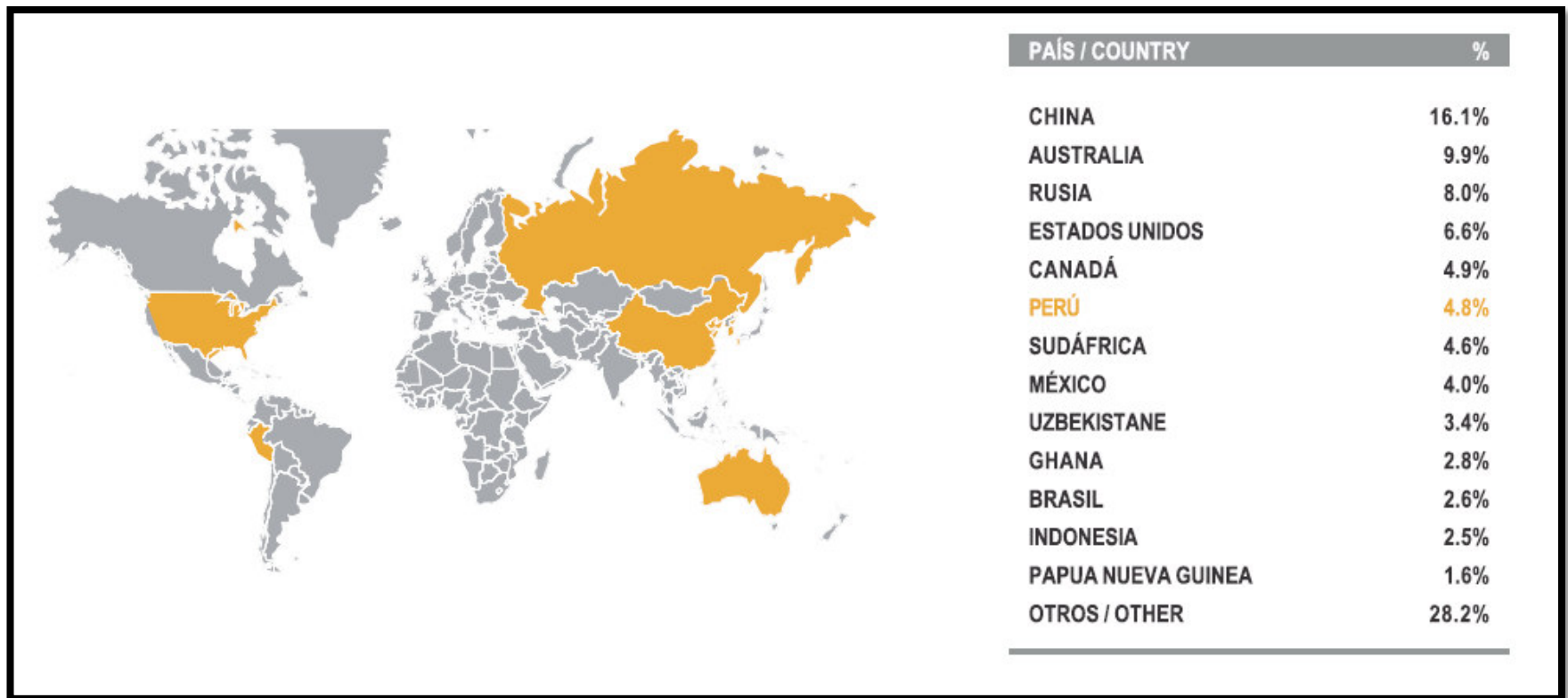
### 3.4.3 PRODUCCIÓN INTERNACIONAL DEL ORO POR PAÍS

**TABLA 3.6** Producción internacional de oro por país

2006-2015 : PRODUCCIÓN NACIONAL DE ORO POR PAIS (MILES DE ONZAS FINAS) GOLD DOMESTIC PRODUTOR BY COUNTRY (THOUSANDS OF FINE OUNCES)										
PAIS/COUNTRY	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>TOTAL</b>	<b>76,125</b>	<b>75,279</b>	<b>73,065</b>	<b>78,906</b>	<b>82,288</b>	<b>85,591</b>	<b>85,371</b>	<b>87,417</b>	<b>96,262</b>	<b>97,579</b>
CHINA	7,877	8,841	9,163	10,288	11,092	11,639	11,896	13,374	14,468	15,754
AUSTRALIA	7,941	7,941	6,912	7,202	8,391	8,295	8,038	8,242	8,809	9,645
RUSIA	5,123	5,047	5,531	6,200	6,174	6,430	6,591	7,154	7,941	7,780
ESTADOS UNIDOS	8,102	7,652	7,491	7,170	7,427	7,523	7,395	7,154	6,752	6,430
CANADÁ	3,328	3,286	3,054	3,130	2,926	3,119	3,279	3,857	4,887	4,823
<b>PERÚ</b>	<b>6,486</b>	<b>5,443</b>	<b>5,772</b>	<b>5,912</b>	<b>5,275</b>	<b>5,344</b>	<b>5,186</b>	<b>5,023</b>	<b>4,504</b>	<b>4,663</b>
SUDÁFRICA	8,749	8,121	6,840	6,354	6,067	5,819	5,466	4,977	4,887	4,501
MÉXICO	1,253	1,265	1,619	1,652	2,334	2,701	2,797	3,048	3,794	3,858
UZBEKISTAN	2,733	2,733	2,733	2,894	2,894	2,926	2,894	3,048	3,215	3,312
GHANA	2,245	2,322	2,346	2,568	2,636	2,572	2,861	2,799	2,926	2,733
BRASIL	1,385	1,595	1,758	1,802	1,865	1,993	1,800	2,208	2,572	2,572
INDONESIA	2,996	3,789	2,070	4,180	3,858	3,086	3,054	1,897	2,218	2,411
PAPUA NUEVA GUINEA	1,876	1,850	2,169	2,180	2,180	2,122	1,929	1,773	1,704	1,606
OTROS/OTHER	15,997	15,363	15,595	17,370	19,167	22,023	22,184	22,861	27,585	27,489

\* Fuente: Ministerio de Energía y Minas del Perú (2015)

**FIGURA 3.3** Producción internacional de oro por país (%)



\* Fuente: Ministerio de Energía y Minas del Perú (2015)

#### **3.4.4 EXPORTACIONES**

El volumen exportado de oro se incrementó 6.9% en 2015 respecto al año previo, principalmente por los mayores embarques de Río Alto y Buenaventura. En el año 2015 se registró un aumento de 366 mil onzas troy.

En cuanto al valor de exportaciones de oro, se registra una caída de -2.07% llegando a un valor de 6,590 millones de dólares, debido a una caída del precio del oro promedio en 8.42%. [8]

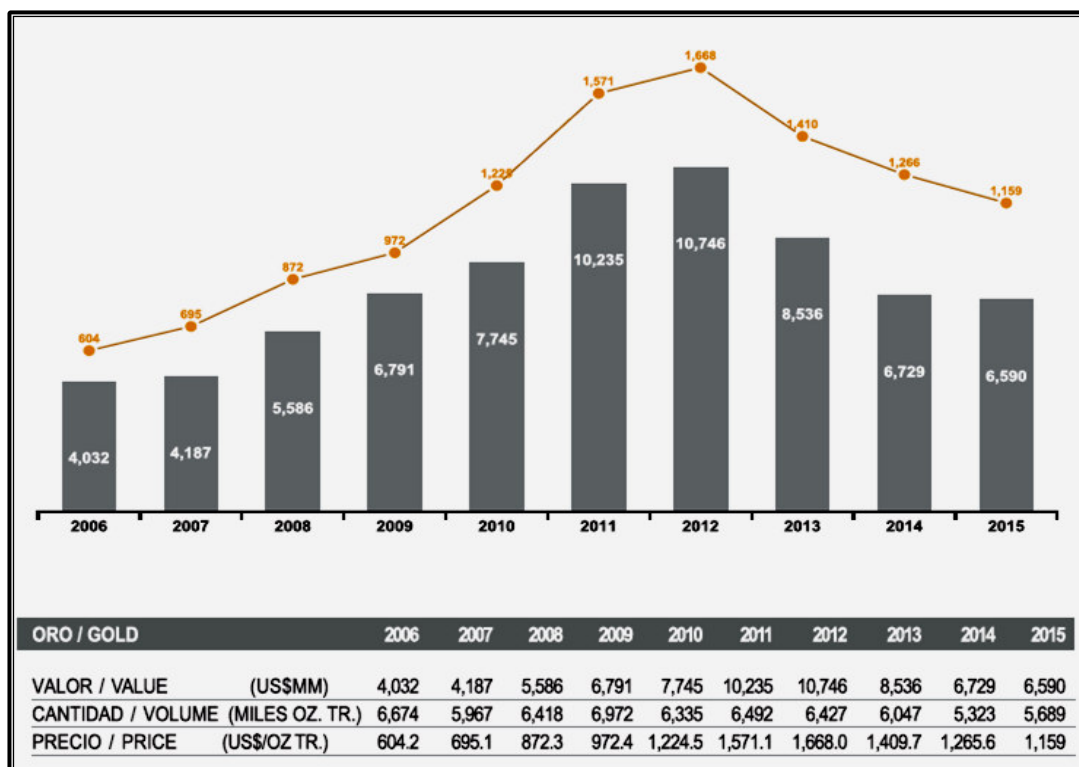
En relación a los destinos de exportación, los mayores envíos se realizaron a Suiza, Canadá y Estados Unidos que concentraron el 77.37% del valor total de las exportaciones nacionales del precioso metal. [8]

El consumo mundial de oro, disminuyó con la caída del mercado de valores de China en la primera mitad del 2015, que según se informa, desalentó la inversión en lingotes de oro, monedas y joya. El oro almacenado por los fondos negociados en bolsa física también disminuyó durante los últimos 3 años, aunque los bancos centrales, aprovechando los precios más bajos, aumentaron su compra de lingotes de oro. [8]

Pese a ello, se destaca a principios del año 2016, que el consumo interno de oro de Estados Unidos utilizado en la producción de monedas, barras y joyas se incrementó debido a la mayor demanda generada por el menor precio del oro y la mejora del entorno económico en ese país. [8]

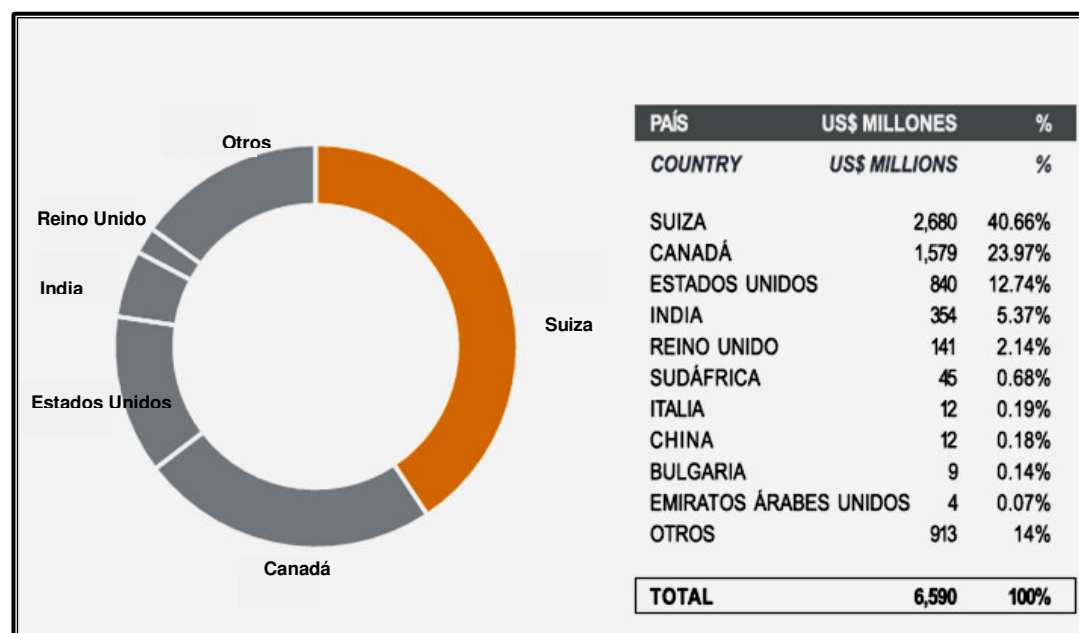


**FIGURA 3.4** Evolución anual de las exportaciones de oro y su cotización



\* Fuente: Ministerio de Energía y Minas del Perú (2015)

**FIGURA 3.5** Destino de las exportaciones nacionales de oro



\* Fuente: Ministerio de Energía y Minas del Perú (2015)

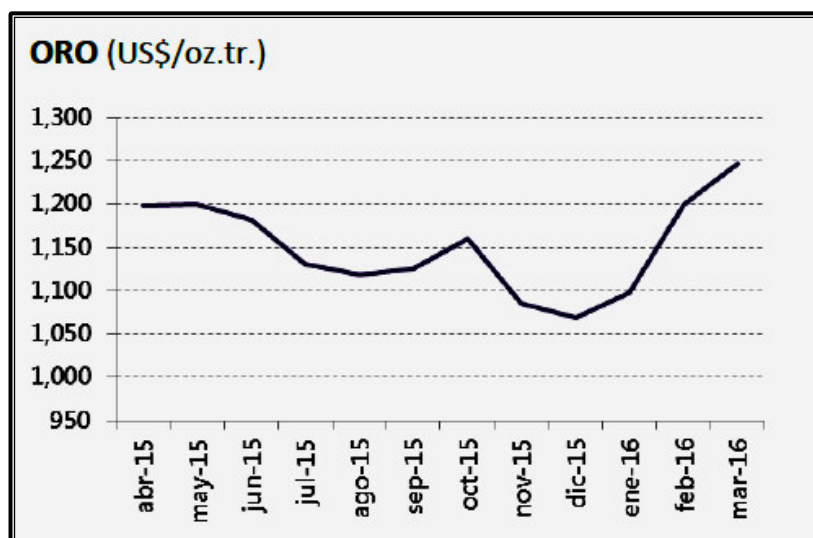
### 3.4.5 COTIZACIÓN DEL ORO

El precio del oro se ha recuperado y se ha posicionado nuevamente como activo de refugio (seguridad en sus inversiones) frente a la desaceleración de la economía mundial y la fortaleza que hoy muestra se debe a un escenario de incertidumbre internacional. [7]

En lo que va del 2016 el precio del oro ha logrado recuperar los niveles registrados en 1974, al situarse entre 1,266 y 1,250 dólares la onza, esta recuperación del precio del oro es favorecida por los temores a una posible recesión en Estados Unidos y las dudas sobre los niveles de crecimiento de la economía China, estos factores contribuyeron para fortalecer el valor del metal precioso que recuperó su posicionamiento como activo de refugio frente a la desaceleración de la economía mundial. [7]

La fortaleza que muestra el oro está justificada en un escenario de incertidumbre internacional, lo que le da espacio para recuperar posiciones tras tener una cotización promedio de 1,161 dólares en el 2015. En lo que va del 2016 de todos los metales que produce el Perú han mantenido una tendencia negativa a excepción del oro y estaño, cuya recuperación ha permitido regresar a los valores de hace un año. [7]

**FIGURA 3.6** Fluctuaciones en el precio del oro



\* Fuente: Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel (2015)

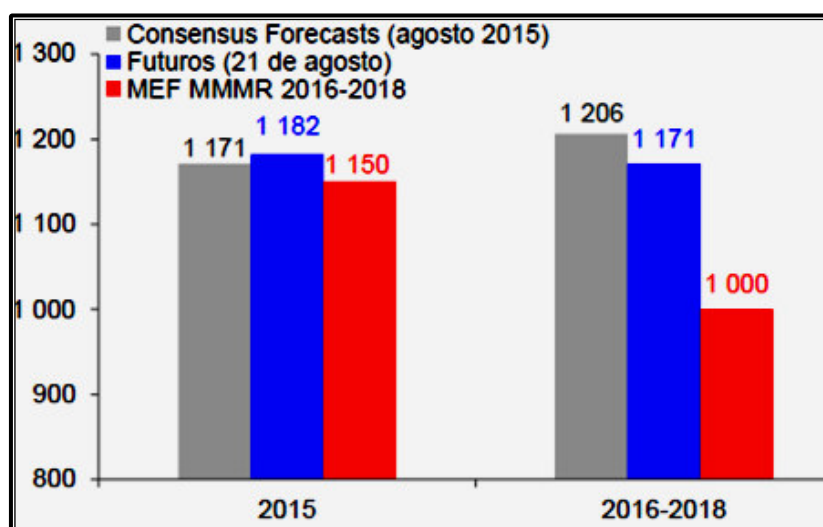
### 3.4.5.1 COTIZACIÓN PROYECTADA DEL ORO

El precio del oro se revisa a la baja en el 2015 de US\$1230 onza troy de abril a US\$1150, y para el 2016-2018 de US\$ 1243 a US\$ 1000 ante las expectativas de incremento en la tasa de interés de la FED (Sistema de Reserva Federal) y un exceso de oferta del oro en el mercado. [10]

Los futuros de los precios del oro, esperan un valor de US\$ 1171 onza troy para el 2016-2018 en promedio. Asimismo, bancos de inversión como Goldman Sachs y Morgan Stanley sostienen que los precios del oro podrían caer por debajo de US\$ 1000 por onza troy a fines de este año. [10]

En la actualidad el precio del oro ha tenido un incremento de 18% en lo que va del 2016, rompiendo con la tendencia a la baja de más de dos años. Esta recuperación del precio del oro se da en un ambiente en el que los fundamentos de oferta y demanda siguen siendo positivos pero, además, las expectativas de incremento de tasas de interés en EE.UU se han reducido, esta tendencia de subidas y bajadas del precio del oro se darán cíclicamente, ya que el mercado actual es muy volátil ante la oferta y la demanda. [10]

**FIGURA 3.7** Cotización del Oro (US\$/onza troy)



\* Fuente: Arias Minaya, Luis A. (2015)

### **3.4.6 FACTORES QUE AFECTAN AL PRECIO DEL ORO**

Los principales determinantes del precio del oro son:

#### ***La estructura del mercado***

Desde 1971 hasta la actualidad, el precio del oro ha tenido dos ciclos muy alcistas. El primer ciclo fue en 1987 debido a que hubo un crecimiento espectacular de la economía asiática. En 1999, el precio del oro tuvo una tendencia alcista por el primer acuerdo de Washington en que los Bancos Centrales de las economías industrializadas decidieron reducir las ventas de oro para no afectar al precio y por la estabilidad política y económica mundial. En 2007, el precio experimentó un crecimiento significativo debido a la crisis financiera internacional, lo que ocasionó que los inversionistas aumentaran su demanda de oro, ya que se consideraba este metal como un activo de refugio en épocas de incertidumbre. En este período, el precio del oro mostró gran volatilidad debido a la crisis financiera internacional, que específicamente empezó en el año 2006. Finalmente, el crecimiento de la demanda de oro ha sido impulsado por el crecimiento económico de los países como la India y China. [7]

#### ***Debilidad del dólar***

El dólar es conocido como una moneda de reserva mundial. Es la moneda de referencia con la que compramos oro. Su debilidad es debido a la bajada de los tipos de interés, por lo que aumenta el precio del oro, es decir, que si el dólar está bajo con respecto al euro, podremos comprar más oro. Efectivamente, tanto la debilidad como la fortaleza del dólar han demostrado su influencia inversa sobre la cotización del oro. A lo largo de estos años, hemos visto como el precio del oro ha estado ligado a los escenarios inflacionistas (aumento generalizado de los precios de productos y servicios) y deflacionistas (contrario a la inflación). Por esa razón, los inversores siempre colocan su dinero en aquellos activos que creen que van a ganar valor con el paso del tiempo, y por ello el oro es la alternativa más habitual como medio de inversión. [7]

### ***Factores políticos***

Como las inestabilidades políticas, las guerras e invasiones hacen que aumente el precio del oro debido a que existe miedo de que la moneda pueda volverse inútil. Por eso, los inversores depositan su dinero en los metales preciosos. [7]

### ***Desastres naturales***

El oro se extrae del subsuelo, es decir, que si hay desastres naturales como los terremotos, temporadas con mal tiempo u otros, éstos afectan a la producción del oro, y por tanto, puede tener incidencias sobre su precio. [7]

### ***Noticias y eventos internacionales***

Los inversores tienen preferencia por la estabilidad y la previsibilidad, ya que de este modo pueden tomar decisiones con el menor riesgo posible. Ésta es la razón por la cual los inversores están siempre al corriente acerca de lo que está sucediendo en el mundo. Así que si por alguna razón un evento afecta, o puede afectar potencialmente, el entorno económico, o a las expectativas de los inversores, con seguridad tendrá un efecto automático en sus acciones, y por consiguiente en el precio del oro. Así sucedió el día en que tuvo lugar el atentado terrorista a las torres gemelas de Nueva York cuando el precio del oro subió más de un 5% en tan sólo dos horas. [7]

### ***Otros factores***

Entre otros, el aumento del mercado de lujo, el rol de activos de refugio y pocas reservas de oro en el mundo son factores que afectan positivamente en el precio del oro. Por otro lado, la crisis económica, provoca una bajada de la demanda en joyería “barata” (la de sólo oro sin piedras), por lo que afecta negativamente al precio del oro. [7]

Por tanto, no podemos predecir con exactitud cómo será el precio del oro a largo plazo pero podemos hacer un análisis histórico donde el valor del oro siempre ha sido positivo. Siempre que tengamos en

cuenta los factores como la inflación, intercambio de divisas (intercambio de una moneda por otra) y situación económica, podremos predecir con certeza que tendencia puede seguir el precio del oro. [7]

### 3.4.7 CARTERA DE INVERSIONES MINERAS EN EL PERÚ

El ministerio de Energía y Minas elabora mensualmente el boletín estadístico “Cartera de Inversiones Mineras”, que está compuesto por un promedio de 50 proyectos de mediana y gran envergadura dividido en cuatro aspectos [9]:

- Ampliación de unidades mineras en etapa de operación.
- Proyectos en etapa de exploración avanzada con estudio ambiental aprobado.
- Proyectos con estudio ambiental en proceso de evaluación.
- Proyectos en etapa de exploración.

La cartera de inversiones mineras a diciembre del 2015 ascendió a 56,899 millones de dólares, como se observa en el cuadro [9]:

**TABLA 3.7** Situación de la cartera de inversiones mineras 2015

<b>SITUACION DE LA CARTERA DE INVERSIONES MINERAS 2015</b>		
<b>ETAPA DEL PROYECTO</b>	<b>INVERSIÓN MILLONES US\$</b>	<b>PARTICIPACIÓN</b>
Ampliaciones	9,215	16.20%
Con EIA aprobado en construcción	23,871	41.95%
Con EIA presentado	884	1.55%
En exploración	22,929	40.30%
<b>Inversión total</b>	<b>56,899</b>	<b>100.00%</b>

\* Fuente: Luna Córdova, Henry (2016)

### ***Cartera de inversiones***

La actividad minera en el Perú está a cargo de empresas mineras de clase mundial de origen peruano y empresas extranjeras que provienen de China, Canadá, Estados Unidos, México, Japón, Australia, Brasil y Corea. La inversión minera en cada proyecto fluctúa entre los 500 millones y 10000 millones de dólares. [9]

**TABLA 3.8** Cartera de inversiones 2015

<b>CARTERA DE INVERSIONES MINERAS 2015</b>		
<b>PAÍS INVERSIONISTAS</b>	<b>INVERSIÓN MILLONES US\$</b>	<b>PARTICIPACIÓN</b>
China	19,189	34%
Canadá	8,937	16%
Estados Unidos	5,335	9%
Estados Unidos / Perú	4,800	8%
México	4,160	7%
Perú	3,775	7%
Reino Unido/ Japón	3,300	6%
Australia	3,135	6%
Brasil	2,034	4%
Reino Unido/ Australia	1,000	2%
Perú/ Corea/ Japón	744	1%
Japón	490	1%
<b>TOTAL</b>	<b>56,899</b>	<b>100%</b>

\* Fuente: Luna Córdova, Henry (2016)

Los proyectos mineros se desarrollan en 15 regiones del país; entre las que destacan Apurímac, Arequipa y Cajamarca, regiones que concentran el 68% del total de la cartera de inversiones mineras. [9]

### 3.4.8 INVERSIÓN EN PROYECTOS AURÍFEROS Y ARGENTÍFEROS

El 22% de la cartera de inversiones mineras está compuesta por 13 proyectos mineros que destacan por la futura producción anual de oro y plata, estimada en 1'387 000 onzas de oro y 20'879 000 onzas de plata, respectivamente. [9]

**TABLA 3.9** Cartera de inversiones mineras de proyectos auríferos y argentíferos

CARTERA DE INVERSIONES MINERAS DE PROYECTOS AURÍFEROS Y ARGENTÍFEROS						
Etapa del proyecto	Mineral	Nombre proyecto	Inversión proyectada US\$		Producción anual	Proyectada (OZ)
			Total	Acumula	Oro	Plata
Ampliaciones						
	Au	Ollachea	180			
	Ag	San Luis				12,000
	Au, Ag	Corani	664	664	113,000	8,000,000
		Shahuindo	132	312	84,000	167,000
		Crespo	110		28,000	2,700,000
		Tambomayo	340	450	150,000	3,000,000
	Au, Cu	Minas Conga	4,800	4,800	680,000	
Con EIA aprobado en construcción						
	Ag	Santa Ana	71	71		5,000,000
	Au	San Gabriel	520	520	220,000	
Con EIA presentado						
	Au, Cu	Quicay II				
		Zafranal	1,122	1,122	30,000	
	Au, Ag, Cu	Cotabambas	1,963	1,963		
	Au, Ag, Cu, Mo	Galeno	2,500	2,500	82,000	2,000,000
En exploración						
Proyectos con contenido de oro y plata			12,402	12,402	1,387,00	20,879,000
Cartera de Inversiones nacional			56,899	56,899	1,387,00	20,879,000

\* Fuente: Luna Córdova, Henry (2016)



### **3.5 MÉTODOS DE TRATAMIENTO EN MENAS AURÍFERAS**

Es posible recuperar el oro, empleando los siguientes métodos de tratamiento:

#### **3.5.1 CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA**

##### **3.5.1.1 GENERALIDADES**

Tal vez la más antigua forma de concentrar minerales, es decir, de separar la parte útil en un concentrado de la parte inútil o ganga, que constituirá el relave. La concentración gravimétrica se basa en la separación de partículas de diferente forma, tamaño y peso específico, por medio de la fuerza de gravedad (que a veces se encuentra acompañada de la fuerza centrífuga) [5]

Hoy en día se emplea la concentración gravimétrica en el procesamiento de minerales muy pesados y que no responden fácilmente a la flotación; así como de aquellos que presentan tamaños de liberación relativamente gruesos y/o cuando una excesiva conminución (reducción de tamaños de los minerales) puede conducir a “sliming” (laminas) y pérdidas de recuperación. Además, en caso de operaciones en las que la simplicidad del circuito es de ventaja, como “pre concentración” de minerales de baja ley, y cuando su bajo costo energético (bajo consumo de energía) y su superioridad ecológica pueden ser decisivos. Estos últimos factores convierten a los métodos gravimétricos, ya sean solos o en combinación con otros métodos, en una vía atractiva de tratamiento.

Así se trata actualmente minerales de estaño y tungsteno, así como de oro (todos de alto peso específico), y de carbón (que es más liviano que la ganga), mediante una u otra alternativa del método gravimétrico. En caso del oro, son de basta aplicación en el Perú, y constituyen el método preferido en el tratamiento de arenas de lavaderos de oro, y aún, forman parte en combinación con otros métodos, de circuitos de beneficio de minerales de oro de todo tipo. [5]

### 3.5.1.2 FUNDAMENTOS Y CRITERIOS DE APLICACIÓN

El principio que explica la concentración por medio de gravedad es el “asentamiento obstaculizado”, es decir, la velocidad mayor o menor de asentamiento de partículas de diferente tamaño y peso, en un medio líquido, que contiene a su vez partículas finas del mismo sólido, las cuales obstaculizan o retardan la caída de las partículas que se pretende diferenciar por su velocidad de asentamiento. [4]

La presencia de gran cantidad de partículas más finas, entorpece el proceso de separación. [4]

El criterio fundamental, sin embargo, es el peso, o mejor dicho, la relación entre los pesos específicos de la mena y ganga, con la del medio líquido, que se expresa como sigue [23]:

$$\text{criterio de concentración} = Q = \frac{D_p - D_m}{D_l - D_m}$$

\* Fuente: Taggart, Arthur H. F. (1966).

Donde:

- $D_p$  = Densidad de partículas pesadas (mena)
- $D_l$  = Densidad de las partículas livianas (ganga)
- $D_m$  = Densidad del medio fluido de separación

Si “Q” es mayor a 2.5, entonces la concentración por gravedad es relativamente sencilla. Si el valor de “Q” es menor a 2.5, la eficiencia de separación decrece, y por debajo de 1.25, la separación no es comercialmente posible. [4]

Si suponemos una densidad del líquido = 1, y de la ganga = 2.5, resulta recomendable que el valor del criterio de concentración sea = 2.5, con la cual la densidad (mínima recomendable) de la mena pesada resulta de 4.75. Algunas densidades de menas/metales pesados, que están normalmente asociados a procesos gravimétricos, son [5]:

**TABLA 3.10** Densidades de las menas más importantes

<b>DENSIDADES DE LAS MENAS MAS IMPORTANTES</b>	
Oro	1.56/19.3
Casiterita	6.8/7.1
Galena	7.4/7.6
Plata	10.5
Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )	5.2
Scheelita ( $\text{CaWO}_4$ )	5.9/6.1

\* Fuente: Castillo Migone, Jorge (2014)

Se comprende fácilmente que mientras mayor sea la diferencia entre densidades de menas pesadas vs. ganga, y entre estas y la densidad del líquido, el proceso será más eficiente, y en especial, que la presencia de partículas finas, que forman una suspensión con el agua, con densidad mayor que 1 con mayor viscosidad, es particularmente negativa, por disminuir la velocidad de asentamiento obstaculizado de las partículas útiles, de menas pesadas. [4]

### **3.5.1.3 MÉTODOS DE SEPARACIÓN POR GRAVEDAD**

En general, los métodos de separación por gravedad se agrupan en tres categorías principales [5]:

- *Separación por medios densos*, en el cual las partículas se sumergen en un baño que contiene un fluido de densidad intermedia, de tal manera que algunas partículas floten y otras se hundan. [5]
- *Separación por corrientes verticales*, en la cual se aprovechan las diferencias entre velocidades de sedimentación de las partículas pesadas y livianas, como es el caso del jig. [5]
- *Separación en corrientes superficiales de agua* o “clasificación en lámina delgada”, como es el caso de las mesas concentradoras y los separadores de espiral. [5]

### 3.5.1.4 EQUIPOS DE CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA

Los principales equipos de concentración gravimétrica (más usados en la industria minera), podemos clasificarlos según el mecanismo de aplicación en convencionales y centrífugos dentro de los cuales los principales son [5]:

**TABLA 3.11** Equipos de concentración gravimétrica

CONVENCIONALES	CENTRIFUGOS
JIGS	FALCON
MESAS VIBRATORIAS	KNELSON
ESPIRALES	

\* Fuente: Castillo Migone, Jorge (2014)

### 3.5.1.5 CONCENTRADORES CONVENCIONALES

#### ***Jigs***

Se usa para concentrar minerales gruesos (3-10 mm). En un jig la separación de minerales de diferente gravedad se realiza en una cama la cual pulsa bajo la influencia de una corriente de fluido que produce estratificación, esto dilata la cama del material que se está tratando, de manera que las partículas pesadas (alta gravedad específica) caen al fondo bajo una condición, probablemente similar a una sedimentación impedida, mientras que las partículas finas penetran los intersticios de la cama, moviéndose hacia arriba. [5]

Durante el golpe hacia arriba las partículas se reorganizan:

- Las partículas ligeras ascienden a posiciones superiores.
- Las partículas pesadas se mueven hacia posiciones bajas.

Durante el golpe de retorno la cama se cierra y las partículas pesadas descienden a través de la cama hacia la zona de concentrados.

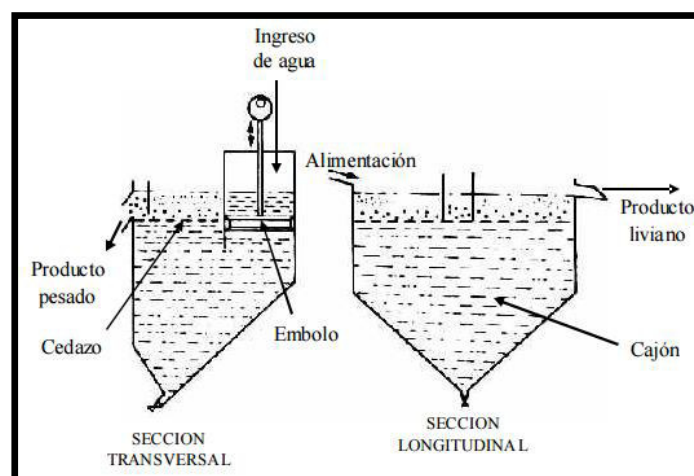
Al entrar las partículas al jig, la fuerza que hace que estas se muevan en dirección transversal está determinada por la alimentación y las dimensiones del equipo. Por otro lado la fuerza clasificadora se da como resultado de la pulsación o el gasto de agua alimentado al jig [5]. La acción pulsante del agua expande la cama de partículas, todas estas sin excepción se ven forzadas a viajar una distancia hacia arriba, su desplazamiento ascendente está dictado o depende del tamaño, densidad, viscosidad del medio, etc. [5].

### *Características de los jigs*

Hay diferentes tipos de jigs, los cuales difieren por la geometría, accionamiento, y otros detalles de construcción. A pesar de la gran variedad de jigs se puede decir que ellos se componen de los siguientes elementos básicos [11]:

- Una caja fija, en cuyo interior el medio como fluido sufre el movimiento de impulsión y succión.
- Un mecanismo de accionamiento, generalmente compuesto de motor, pistón, sistema de lubricación, etc.
- Una criba para mantener el lecho.
- Un sistema de descarga del material flotado y del hundido.
- Varios factores ejercen influencia en la estratificación obtenida en un jig, entre estos se pueden señalar el tipo de lecho, distribución de la mena, distribución del agua, frecuencia, amplitud, etc.

**FIGURA 3.8** Sección transversal y longitudinal de un Jig.



\* Fuente: Castillo Migone, Jorge. (2014)

### ***Mesas vibratorias***

Las mesas vibratorias son equipos de concentración que actúan a través de superficies con movimientos acelerados asimétricos, combinados muchas veces con el principio de escurrimiento laminar.

La mesa Wilfley fue lanzada en 1895 y se constituyó en el principal modelo de mesa vibratoria. Después de constatarse su eficiencia su uso se propagó y surgieron nuevos modelos. [11]

La principal modificación de la mesa Wilfley fue el cubrimiento parcial del tablero con riffles paralelos al eje longitudinal, lo que permitió el tratamiento de alimentación gruesa y aumentó su capacidad. La mesa Wilfley dispone de un mecanismo que proporciona un movimiento de vibración lateral diferenciado en sentido transversal del flujo de la pulpa, que causa el desplazamiento de las partículas a lo largo de los riffles. [11]

### *Variables de operación de las mesas vibratorias*

#### *Variables de diseño [11]*

- Forma de la mesa.
- Material de la superficie de la mesa.
- Forma de los riffles.
- Característica de los riffles.
- Aceleración y desaceleración.
- Ubicación de la alimentación.

#### *Controles operacionales [11]*

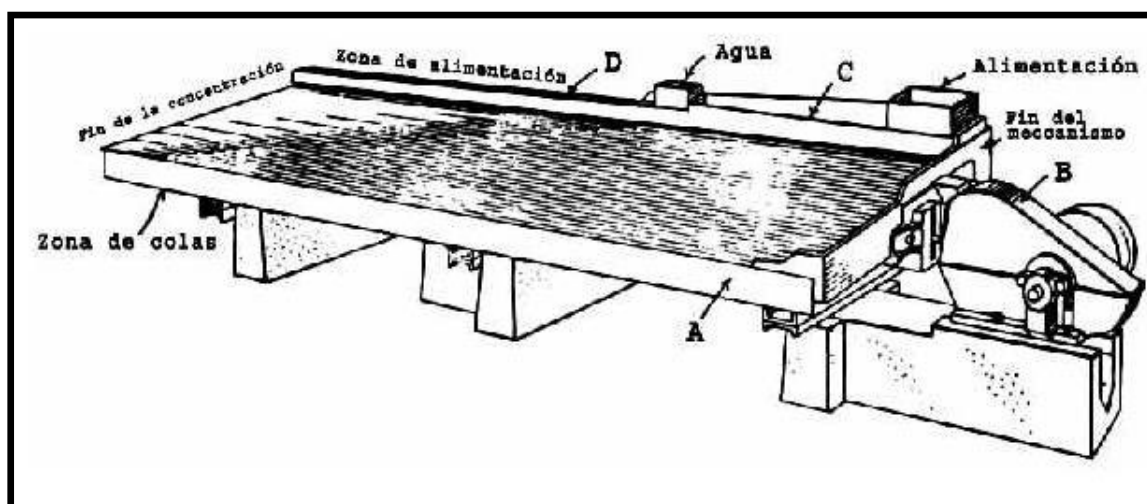
- Inclinación de la mesa.
- Densidad de la pulpa en la alimentación.
- Agua de lavado.
- Posición de los cortadores de los productos.

#### *Características de la concentración en mesas vibratorias [11]*

- El revestimiento del deck puede ser de goma natural, sintética, poliuretano, metano impregnado de zircón, o fibra de vidrio.

- El límite superior del tamaño de partículas minerales tratadas en las mesas vibratorias es de aproximadamente 2 a 3 mm (para carbón puede llegar hasta 15 mm), mientras que el tamaño mínimo de las partículas que se pueden concentrar en estos equipamientos es del orden de 75 micrones. Es necesario señalar que el tamaño mínimo de los materiales que se pueden tratar en una mesa es en función del volumen del agua y del movimiento de la mesa, siendo esencial que las partículas sedimenten para que puedan ser recogidas en el concentrado.
- El porcentaje de sólido de la pulpa de alimentación debe ser suficientemente bajo para permitir la estratificación y dilatación entre los riffles. Densidades de pulpas máximas típicas son 25% de sólidos para arenas y 30% para materiales finos.
- El aumento de la inclinación lateral reduce la necesidad de agua de lavado, sin embargo, estrecha los rangos de las diferentes fracciones, dificultando el corte, lo que puede ser aceptable en operaciones rougher y no en etapa cleaner.

**FIGURA 3.9** Mesa vibratoria.



\* Fuente: Castillo Migone, Jorge. (2014)

### ***Concentración en espirales***

El primer tipo de espiral Humphrey fue introducido en 1945. El principio básico se ha mantenido hasta la actualidad, pero con evoluciones considerables en cuanto al diseño y técnicas de fabricación. Los materiales de construcción empleados han evolucionado desde la madera y hierro fundido hasta el poliéster reforzado con fibra de vidrio, pasando por aleaciones, hormigón, goma, etc. [11]

Actualmente, la mayoría de los fabricantes construyen en poliéster reforzado con fibra de vidrio, con recubrimientos de poliuretano o goma, y este sencillo proceso de fabricación ha sido uno de los motivos del rápido avance en el diseño de estos separadores. Los mayores avances en el diseño han incidido en el perfil y paso del espiral. El campo de aplicación se ha expandido principalmente, debido al desarrollo de espirales en las cuales el paso y el perfil cambian a lo largo de su longitud. [11]

La concentración en espirales puede realizarse por etapas, en general una etapa de desbaste es seguida de etapas de limpieza. En el caso de menas metálicas, normalmente se retira un relave final en la etapa de desbaste, mientras que, un preconcentrado pasa a la etapa de limpieza. [11]

El funcionamiento de los espirales está basado en el principio de concentración a través de un flujo laminar. Este fenómeno se basa en el hecho que una partícula que se desliza en un canal circular a través de una película de fluido está sujeta por lo menos, a cuatro fuerzas [5]:

- Fuerza gravitacional
- Fuerza centrífuga
- Empuje líquido
- Roce contra el fondo del canal

Cuando la pulpa corre hacia abajo por el canal en espiral de sección semicircular, cada partícula está sujeta a la fuerza centrífuga tangencial al cauce. Esta fuerza es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo e inversamente proporcional al radio en el cual está ubicada la partícula. La fuerza centrífuga empuja al líquido hacia la



periferia del espiral hasta que la corriente de la pulpa alcanza el equilibrio entre la fuerza centrífuga y la de gravedad. En tal caso la velocidad del flujo a través del espiral decrece con la profundidad, siendo máxima en la superficie del líquido y tendiendo a cero hacia el fondo. [5]:

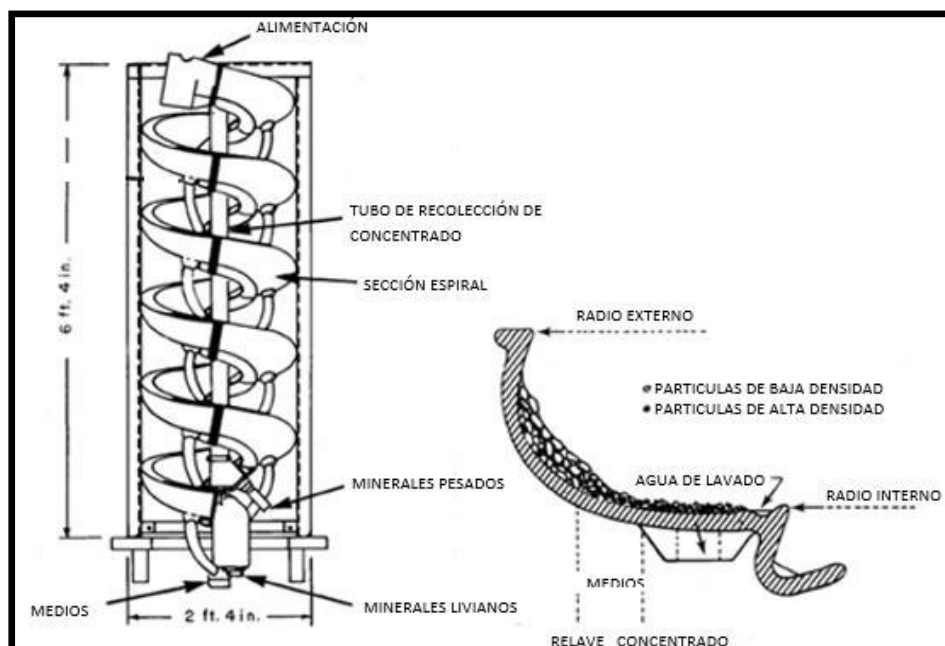
Esta disminución proporcional de la aceleración es mayor en la cercanía del contacto con la superficie del canal, formando sobre él una película de fluido retardado por la fricción. Dicho efecto hace disminuir la fuerza centrífuga en donde las partículas ubicadas en el fondo son llevadas hacia el interior del canal, mientras que las livianas son arrastradas hacia su periferia.

En resumen, la fuerza resultante que llevará las partículas pesadas hacia el interior del canal y que transportará a las livianas hacia su exterior, es la resultante de las cuatro fuerzas nombradas al principio. Existen los modelos Humphrey y Reichert. [5]

Las variables de operación son [5]:

- Alimentación sobre 3 t/h de sólidos.
- Densidad de pulpa sobre 60% de sólidos en peso.
- Granulometría de alimentación: 0.030 – 2 mm
- Volumen máximo de pulpa: 5 m<sup>3</sup>/h y Flujo de agua: 3.5 – 7.5 m<sup>3</sup>/h

**FIGURA 3.10** Espiral Humphrey



\* Fuente: Castillo Migone, Jorge. (2014)

### **3.5.2 CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA - CENTRÍFUGA**

#### **3.5.2.1 GENERALIDADES**

No obstante las ventajas que ofrece el procedimiento de enriquecimiento a través de la fuerza gravitacional, una de las dificultades es la inexistencia de un equipo específico eficiente en el tratamiento de un amplio rango de tamaños. Al respecto, en el transcurrir de los años, se han desarrollado diversos equipos y maquinarias aplicables en diferentes rangos de tamaño. [12]

Los procedimientos gravimétricos convencionales permiten recuperar con relativo éxito partículas mayores a 75  $\mu$ , sin embargo, cuanto menor es el tamaño de las partículas, mayor es la importancia de las fuerzas de viscosidad y fluidez en relación a la densidad; de ahí que la eficiencia en la separación disminuya drásticamente cuando las partículas son más finas. [12]

Durante las últimas décadas, la investigación se ha orientado a mejorar la recuperación de partículas finas comprendidas en el rango de 75 a 15  $\mu$ , utilizando equipos y maquinarias de diseño mejorado como son los conos Reichert y espirales Humphrey, que ofrecen una mejora en la separación húmeda de finos, separador Bartles – Mozley, etc. [12]

Sin embargo, ante la necesidad de contar con una tecnología que permita la recuperación de partículas cada vez más finas se ha intentado, durante las dos últimas décadas, sustituir las fuerzas gravitacionales (convencionales) por fuerzas centrífugas. [12]

Como se recordará, todos los equipos de concentración por gravimetría como las canaletas, mesas vibrantes, máquinas pulsantes, etc., trabajan en campos de fuerza gravitacional. [12]

#### **3.5.2.2 EQUIPOS DE CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA - CENTRÍFUGA**

Los equipos de concentración centrífuga, a diferencia de los anteriormente citados, aumentan la fuerza gravitacional para que la separación se efectúe a un valor de varias veces “G’s”, por lo que,

éstos equipos son más eficaces que los equipos convencionales, donde la concentración de partículas de mayor peso específico se efectúan con más facilidad. [12]

Por ejemplo, en un campo centrífugo de 200 G's, una partícula de oro libre con peso específico aprox. 18, pesará efectivamente aproximadamente 2061 veces más respecto a una partícula de ganga de tamaño equivalente con peso específico aprox. 2.65.

Esto resulta del siguiente cálculo [23]:

$$Q = \frac{D_p - D_m}{D_l - D_m} * Gs \qquad Q_{Au} = \frac{(18 - 1)}{(2.65 - 1)} * 200 = 2061$$

\* Fuente: Taggart, Arthur H. F. (1966).

Estos equipos emplean el principio de sedimentación obstaculizada forzada, es decir, el principio de sedimentación obstaculizada se realiza mediante la aplicación de una fuerza (centrífuga) que incrementa el criterio de concentración mena-ganga al acentuar la diferencia de densidades producto de la fuerza aplicada. [12]

Los principales equipos en aplicación actualmente con este principio son los concentradores centrífugos “Falcon” y “Knelson”

### 3.5.2.3 CONCENTRADORES FALCON

#### ***Generalidades***

El concentrador Falcon, al igual que el Knelson, es de origen canadiense.

Este equipo presenta diferencias en relación al Knelson, principalmente en lo que se refiere a la velocidad de rotación, ya que en el concentrador Falcon, el campo centrífugo es cerca de 5 veces mayor que el del concentrador Knelson, por otra parte en el concentrador Falcon los riffles o canaletas solo se presentan en la parte superior del cono, en cambio en el concentrador Knelson estos rifles o canaletas se presentan en todo el cono tanto en la parte superior como en la inferior. [11]

El principio de separación del concentrador Falcon está basado en la diferencia de pesos específicos de las partículas componentes de una carga mineralizada. Debido a que usa campos gravitatorios altos, que es capaz de separar minerales liberados en rangos de tamaño considerado como finos a ultra finos, donde se observa un aumento en la eficiencia de separación en comparación con otros concentradores gravimétricos. [11]

### ***Parámetros operacionales de diseño***

En el concentrador Falcon los parámetros operacionales son el porcentaje de sólidos en la alimentación, granulometría de la mena, el tiempo de operación, presión del agua y la velocidad del cono. La geometría del rotor es un factor crítico en el desempeño del equipamiento; dependiendo del tipo de mena (con mayor o menor densidad, por ejemplo), habría un rotor con geometría apropiada. [11]

### ***Características***

Sus principales características son [12]:

- Amplio rango de aplicación en el procesamiento industrial de minerales.
- Buena eficiencia en la recuperación de partículas finas.
- Rotor construido de Caucho, poliuretano, carburo y Ni-hard para una máxima resistencia al desgaste.
- Pocas partes móviles.
- Alta confiabilidad en la obtención del concentrado.
- Modelos a escala de laboratorio con alta capacidad.
- Modelos disponibles para la recuperación con elevado peso o alimentación con amplio rango de tamaño de partículas.

### ***Ventajas***

Desde un punto de vista general, las principales ventajas que ofrecen estos equipos son [12]:

- Elevada capacidad de procesamiento.
- Bajo consumo de agua.
- Recuperaciones elevadas, sobre todo en fracciones finas.
- Bajo costo de inversión y de operación.
- Automatización simplificada.
- Preconcentración y concentración de minerales.

### ***Aplicaciones***

Entre sus aplicaciones podemos citar a [12]:

- Recuperación de oro fino a partir de yacimiento primario.
- Retratamiento de sulfuros.
- Recuperación de hierro y estaño fino
- Remoción de ceniza y sulfuros del carbón.
- Recuperación de oro fino a partir de relaves de flotación ó cianuración
- Pre concentración antes de la cianuración para maximizar el rendimiento.
- Retratamiento de relaves de tantalio y estaño fino.
- Retratamiento de hierro fino contenido en relaves.
- Pre concentración de oro y plata a partir de relaves antiguos.
- Pre concentración y deslamado de depósitos de minerales pesados.
- Pre concentración previa a la flotación ó cianuración mediante la remoción de partículas livianas no deseadas.
- Instalación en circuitos de molienda para la recuperación de valores liberados.

## **Modelos del concentrador Falcon**

Actualmente en el mercado existe una numerosa variedad de modelos del centrifugador Falcon, desde aquellos utilizados para escala laboratorio (semi-continuo), hasta los de uso industrial (continuo), cada uno con características y aplicaciones diferentes, además de los últimos modelos desarrollados para material ultra-fino. [13]

### ***Concentradores Falcon Semi Lote “SB”***

La serie de concentradores Falcon modelo “SB” han sido desarrolladas con una simplicidad de diseño, permitiendo la eficiencia en su uso y maximización en los resultados. Ahí donde otros procesos gravimétricos resultan inadecuados, los concentradores Falcon demuestran ser capaces de recuperar partículas liberadas ultrafinas y hacer separaciones de alta calidad utilizando grandes campos centrífugos. En algunas aplicaciones, el circuito Falcon, llega a recuperar hasta el 80% de la producción total de la planta, dependiendo del porcentaje de metales nativos presente. [13]

### ***Recuperación de minerales***

El Concentrador Falcon Modelo “SB” es aplicado en [14]:

- Recuperación de oro libre, plata y platino
- Underflow ó alimentación de ciclones en circuito de molienda
- Limpieza de concentrados
- Retratamiento de relaves
- Aluviales y placeres de oro

### ***Funcionamiento***

Estos concentradores semi-continuos emplean una zona de retención y lavado en la parte superior del rotor, requiriendo de la adición de un pequeño volumen de agua en el proceso. Estas unidades pueden procesar partículas hasta de 6 mm, pero también son muy eficientes en la recuperación de partículas muy finas. [14]

Las partículas en el flujo de ingreso son sometidas a fuerzas de gravedad hasta de 200 G's y son segregadas de acuerdo a su gravedad específica mientras discurren por la pared lisa del rotor. Las capas más pesadas pasan a la zona de concentrado, retenido en las ranuras circundantes de la parte superior del rotor. [14]

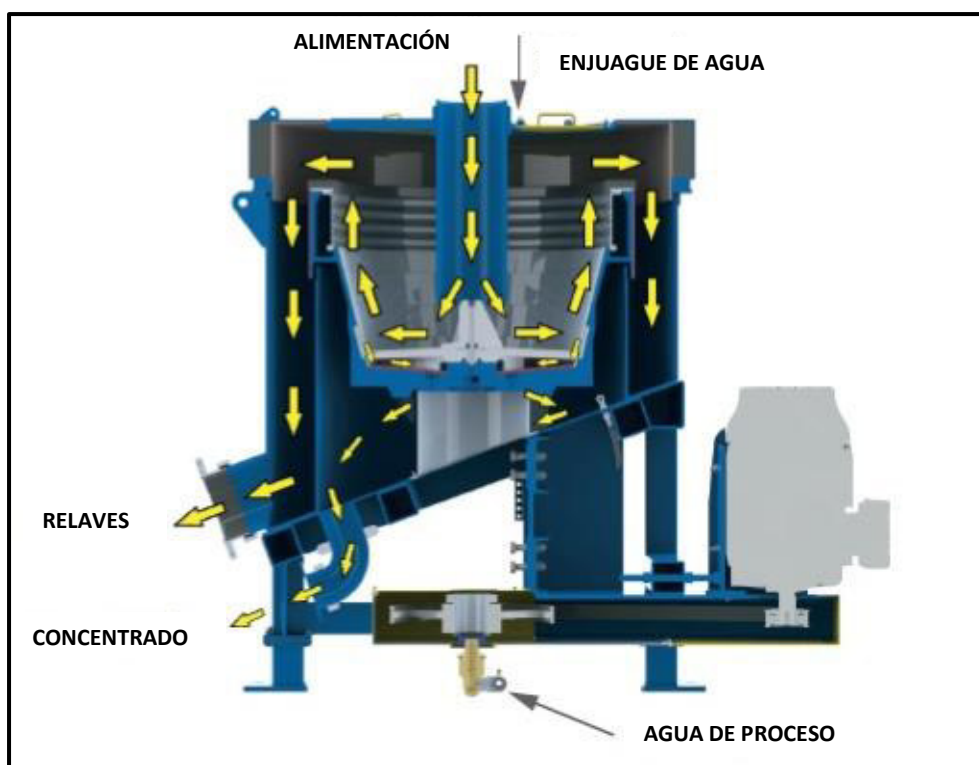
La adición de contra-presión de agua a través de las ranuras presentes en la zona de concentrado, permite que las partículas migren y sean retenidas solo las más pesadas. Las partículas más livianas son eliminadas como relave por la parte superior del rotor. [14]

La alta fuerza de gravedad permite la recuperación de partículas muy finas (aún menores a 10 micrones) y la profundidad de las ranuras de la zona de concentrado permite a las partículas pesadas gruesas ser retenidas con total seguridad. Cuando el concentrado ha llegado a alcanzar una ley suficiente, la alimentación es detenida (por tan solo 30 segundos). El rotor disminuye su velocidad y mediante presión de agua se lava el concentrado que es descargado por la parte baja del rotor y conducido a una canaleta. [14]

#### *Beneficio [14]*

- Cuando los concentradores Falcon modelo “SB” son instalados para concentración primaria alcanzan una productividad constante y eficiente recuperación de oro.
- Emplear un segundo Concentrador para limpieza del primer concentrado reducirá el flujo a cualquier proceso subsiguiente.
- La alta fuerza de gravedad (la mayor en este tipo de procesos mineros), permite la recuperación de partículas muy finas en algunos casos menores a 5 micrones.
- Instalar los concentradores centrífugos Falcon “SB” en la alimentación de ciclones permite la recuperación de partículas finas de oro que normalmente no son recuperadas en el underflow de los ciclones.

**FIGURA 3.11** Concentrador Falcon Semi Lote (SB)



\* Fuente: Sepro Mineral Systems Corp. (2011)

### ***Concentradores Falcon Continuos “C”***

En estos concentradores la recuperación de la parte valiosa, puede ser de hasta 10 micras y capacidades de la unidad de hasta 100 t/h.

Los concentradores Falcon “C” se usan típicamente en aplicaciones de recuperación por gravedad que requieren un rendimiento másico mayor para realizar la concentración, en comparación con los concentradores “SB”. [13]

Estas máquinas, diseñadas para trabajo continuo, son capaces de producir rendimientos másicos de hasta el 40%. [13]

El objetivo principal de los Falcon “C”, es maximizar la recuperación y reducir la cantidad de toneladas para los procesos posteriores. La tecnología es ideal tanto para las aplicaciones de barrido como para las de preconcentrado, ya que no se añade agua durante el proceso. [13]



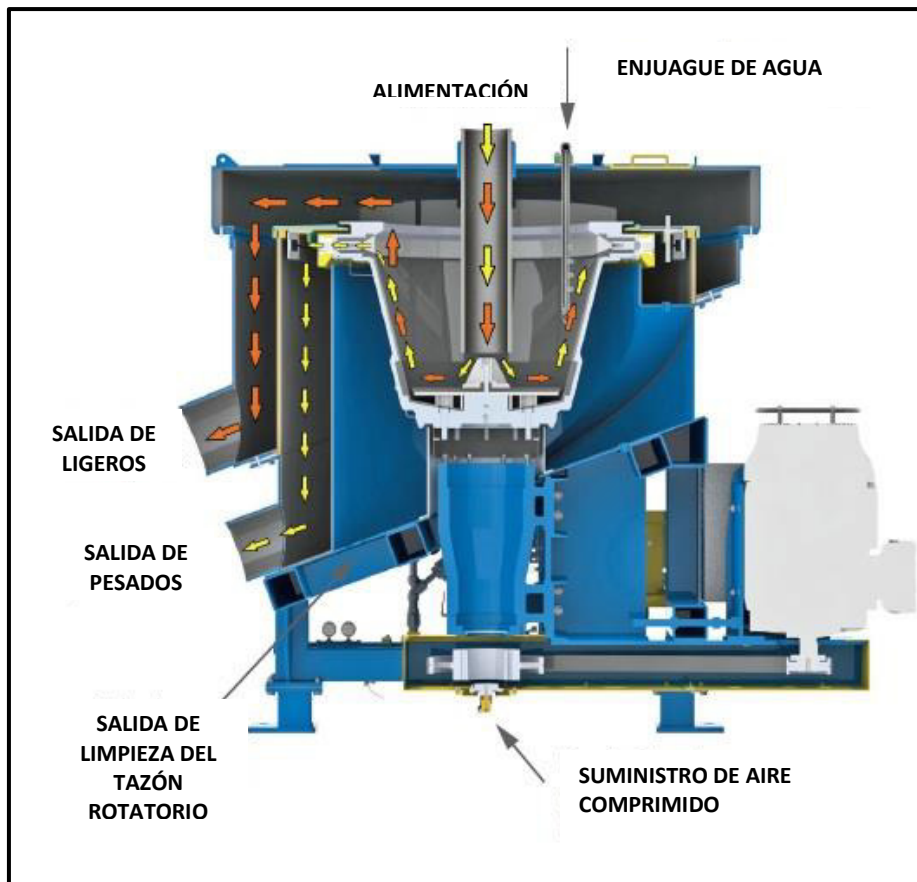
#### *Aplicaciones [15]*

- Concentración primaria de oro, estaño, tántalo, tungsteno, cromo, cobalto, hierro, carbón fino oxidado y uranio.
- Barrido por partículas finas pérdidas por procesos de baja fuerza G's y flotación.
- Preconcentración de minerales pesados.

#### *Ventajas [15]*

- Capacidad de la unidad de hasta 100 T/h.
- La unidad de frecuencia variable (VFD) permite el control de la fuerza G's según la aplicación.
- Materiales de desgaste avanzados y un diseño modular reducen el tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento.
- Alto campo gravitatorio (hasta 300 G's) que permite la recuperación de partículas muy finas.
- No hay consumo de agua de fluidificación o de tiempo sin conexión para el lavado de concentrado.
- Produce concentrado de alta densidad (rendimiento de masa variable de 0% - 40%) por lo tanto, no se requieren espesadores.
- Producción continua de concentrado a >70% de sólidos.
- costos de operación extremadamente bajos.
- Ocupa poco espacio.
- Operación, totalmente automatizada, que proporciona la menor cantidad de tiempo sin conexión y la más alta seguridad de concentrados posible.

**FIGURA 3.12** Concentrador Falcon Continuos (C)



\* Fuente: Sepro Mineral Systems Corp. (2011)

### ***Concentradores Falcon Ultrafinos “UF”***

En estos concentradores las fuerzas pueden ser de hasta de 600 G's y recuperación por gravedad de hasta 3  $\mu$ . [13]

La recuperación de minerales ultra finos ha sido un objetivo de la industria durante muchos años. Con la línea de concentradores “UF” de Falcon, ahora existe una manera económica de recuperar y actualizar partículas con tamaños tan finos como tres micras. El objetivo principal del concentrador “UF” Falcon es barrer partículas ultra finas que comúnmente se rechazan en procesos de la planta, como los lodos.

Este concentrador puede proporcionar una gama casi ilimitada de posibilidades, ya que opera en configuraciones rougher-cleaner o rougher-scavenger en el proceso de flotación. [13]

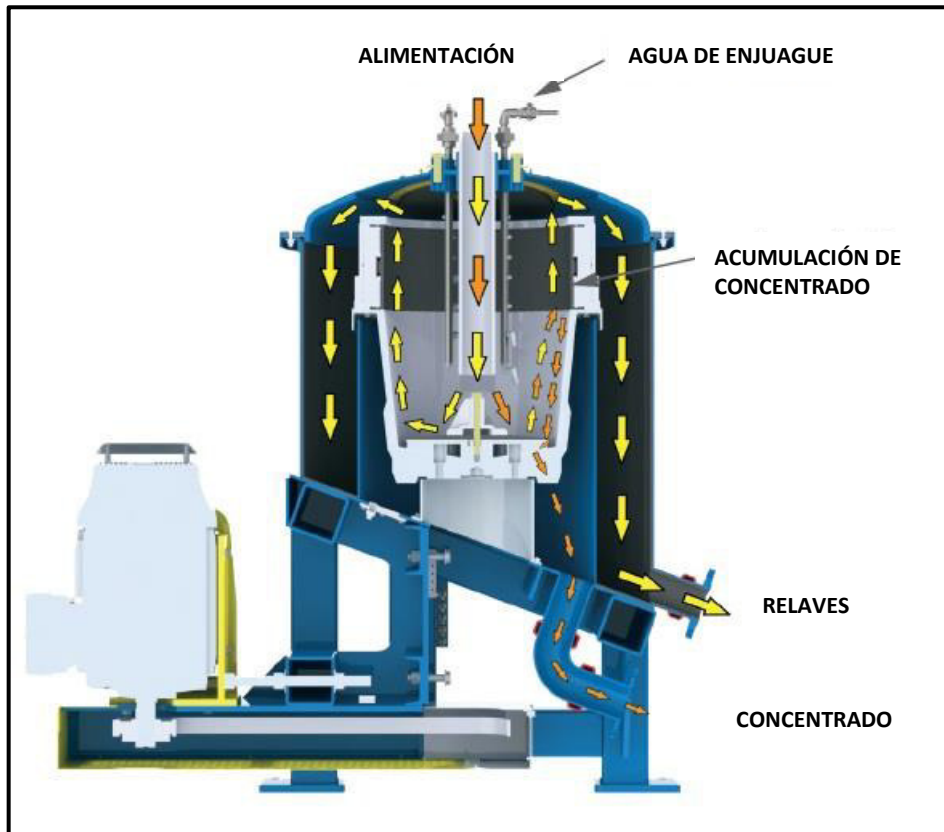
#### *Aplicaciones [16]*

- Recuperación de pulpa ultra finos (estaño, tantalio, tungsteno, etc.).
- Barrido del lodo del overflow del ciclón.
- Actualización de alta recuperación de finos concentrados de flotación.

#### *Ventajas [16]*

- Los campos de alta gravitación (hasta 600 G's), permiten la recuperación de partículas ultra finas.
- La unidad de frecuencia variable (VFD) y un sistema de frenado dinámica se utilizan para reducir considerablemente el tiempo de desconexión para el lavado de concentrados.
- Recuperación de valores previamente irrecuperables a partir de concentrados de flotación.
- Materiales de desgaste avanzados y un diseño modular que reduce el tiempo de inactividad y disminuye los costos de mantenimiento.
- Sin consumo de agua de proceso durante la concentración.
- Costos de operación extremadamente bajos.
- Ocupa poco espacio
- Operación, totalmente automatizada, que proporciona la menor cantidad de tiempo sin conexión y la más alta seguridad de concentrado posible

**FIGURA 3.13** Concentrador Falcon Ultrafinos (UF)



\* Fuente: Sepro Mineral Systems Corp. (2011)

#### **3.5.2.4 CONCENTRADORES KNELSON**

La efectividad de separación en el concentrador Knelson se basa en la generación de una fuerza gravitacional 60 veces superior a la fuerza normal de un equipo convencional que juntamente con el proceso de fluidización, permite la recuperación aún de partículas microscópicas. Esto significa que en el interior del concentrador Knelson las partículas son sometidas a 60 veces la fuerza de la gravedad para asegurar la recuperación de partículas finas que antes se pensaba eran no recuperables por medios gravimétricos convencionales. [12]

*Aplicaciones [12]:*

- Metales preciosos: oro, platino y plata.
- Metales básicos: cobre.

- Metales nocivos para el medio ambiente: plomo y mercurio.
- Recuperación de tantalita, casiterita, ilmenita, rutilo, cromita, etc.
- Recuperación de sulfuros con contenido de oro a partir de colas de lixiviación o flotación.
- Recuperación de oro fino libre.
- Recuperación de valores metálicos a partir de escorias de fundición.
- Productos de calcinación.
- Limpieza de concentrados finos.
- Retratamiento de relaves.

*Ventajas [12]:*

- Recuperación rápida y eficiente a bajo costo.
- Operación confiable y sin problemas.
- Bajo costo de inversión, operación y mantenimiento.
- Operación no contaminante y sin peligro para el medio ambiente.
- Total seguridad del concentrado.
- Total automatización disponible en todos los modelos.

## **Modelos del concentrador Knelson**

### ***Serie de descarga manual (MD)***

A esta serie corresponden los equipos de escala piloto y de laboratorio con capacidades de 1000 Kg/h y 50 kg/h respectivamente. En la operación, las partículas de la alimentación al Knelson de laboratorio son sometidas a una fuerza de hasta 80 veces la gravedad para la recuperación de eventuales partículas denominados como ultra finos. [12]

### ***La serie de descarga central (CD)***

Estas fueron las primeras unidades diseñadas para extraer el concentrado rápidamente y en un ambiente de completa seguridad, habiéndose convertido desde entonces en un equipo estándar en la industria.

Los equipos de esta serie son apropiados para la etapa de preconcentración y para la limpieza de preconcentrados. [12]

### ***La serie de servicio pesado (XD)***

La serie KC-XD, introducido en 1997, ha sido desarrollada para soportar las exigencias de las condiciones más difíciles de operación, ofreciendo mayor capacidad y mejor recuperación en comparación con otros equipos. Son también apropiados para operaciones aluviales o para proyectos de re-tratamiento de relaves antiguos donde se presentan condiciones de acidez. [12]

### ***Serie de recuperación de mercurio (MR)***

El concentrador Knelson de recuperación de mercurio (KC-MR) está diseñado para recuperar mercurio simultáneamente con oro y otros metales preciosos. Recupera el 98% de mercurio metálico elemental, ya sea en su estado natural, presentándose como un producto secundario de una operación minera previa, o que haya ocurrido como resultado de otros procesos industriales. [12]

## **3.5.3 FLOTACIÓN**

### **3.5.3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO**

La flotación se define como un proceso fisicoquímico mediante el cual se produce la separación de los minerales sulfurados del metal a recuperar del resto de minerales y especies que componen la mayor parte de la roca original. [5]

La pulpa proveniente de la molienda, con los reactivos necesarios para la flotación ya incorporados alimenta a las celdas de flotación. En el fondo de las celdas se hace burbujear aire, no en todas, a través de las aspas de agitadores rotatorios ubicados uno por celda, lo cual mantiene la pulpa en constante agitación para permitir que todas las partículas de

mineral dispersas en la pulpa mantengan el mejor contacto con los reactivos, el agua y el aire para que con ello el proceso de flotación se lleve a cabo en forma eficiente. [5]

Los reactivos, que se incorporan a la pulpa en la etapa de molienda para dar el tiempo de residencia que cada uno de ellos necesita para conseguir una pulpa homogénea a la entrada de la flotación, tienen diferentes naturalezas y cumplen distintas funciones, como [5]:

- *Reactivos espumantes*: tienen como objetivo el producir burbujas resistentes.
- *Reactivos colectores*: tienen por objetivo impregnar las partículas de sulfuros de metales a recuperar con características necesarias para que se separen del agua y se peguen en las burbujas del aire, lo cual se conoce como características hidrofóbicas o aerofílicas de las partículas.
- *Reactivos depresores*: Tienen por objetivo provocar el efecto inverso al de los reactivos colectores, esto, es evitar la recolección de otras especies minerales no deseadas en el producto a concentrar y que no son sulfuros.
- *Reactivos activadores*: Tienen por objetivo ayudar al colector a adsorberse en la superficie del mineral a flotar.
- *Modificadores de pH*: Los cuales sirven para estabilizar la acidez de la pulpa en un valor de pH determinado, proporcionando el ambiente adecuado para que ocurra todo el proceso de flotación.

Las burbujas de aire generadas con la agitación de la pulpa y el aire insuflado en el fondo de las celdas, arrastran consigo hacia la superficie los minerales sulfurados hacia donde rebasan por el borde de la celda hacia canaletas que las conducen hacia otras celdas, bombas o espesadores, desde donde esta pulpa es enviada a la etapa siguiente.

El proceso es reiterado en varios ciclos, de manera que cada ciclo va produciendo un producto cada vez más concentrado. En uno de estos ciclos se puede realizar un segundo proceso de flotación para recuperar el concentrado de un segundo metal de interés, con el mismo

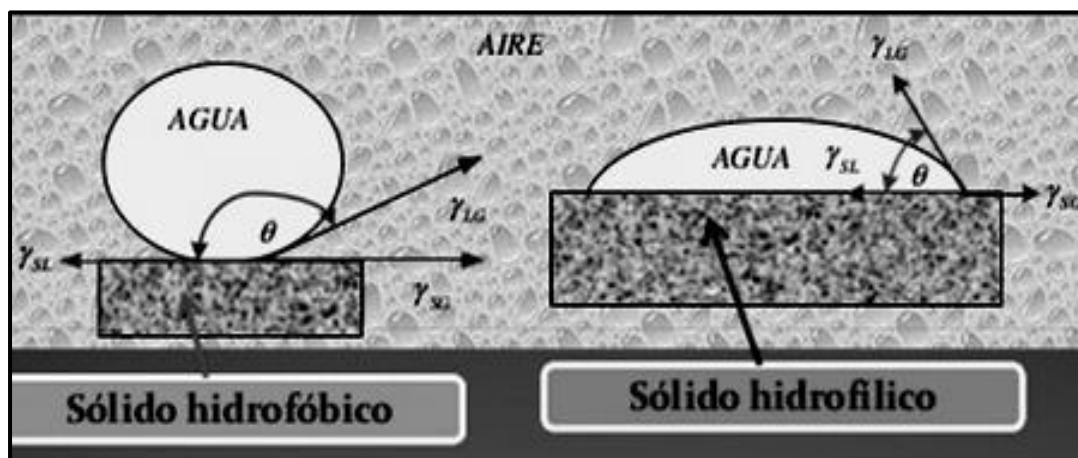
mecanismo anterior pero utilizando reactivos y acondicionadores de pH distintos, pudiendo así obtenerse dos concentrados de dos metales de interés económico. La primera flotación se denomina flotación colectiva, donde el concentrado contiene 2 o más componentes, y la segunda flotación selectiva donde se efectúa una separación de compuestos complejos en productos que contengan no más de una especie individual. [5]

La flotación contempla la presencia de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida representa las materias a separar, la fase líquida es el medio para dicha separaciones y la fase gaseosa generalmente es aire inyectado en la pulpa en forma neumática o mecánicamente para poder formar las burbujas que son los centros sobre los cuales se adhieren las partículas sólidas. [5]

De acuerdo a esto, la flotación de los distintos minerales se basa en las propiedades hidrofílicas o afinidad por el agua e hidrofóbicas, afinidad por el aire de cada especie mineral de interés que se requiere separar de otras especies sin valor comercial, llamadas gangas. [5]

Para relacionar en forma cuantitativa las propiedades hidrofóbicas de un mineral se utiliza el ángulo de contacto. En el caso de la existencia de tres fases, sólida, líquida y gaseosa, corresponde al ángulo formado por el plano tangente a la interfase líquido-gas y el plano formado por el sólido en contacto trifásico sólido-líquido-gas. [5]

**FIGURA 3.14** Ángulo de contacto de las tres fases (aire-agua-sólido)



\* Fuente: Castillo Migone, Jorge (2014)



Pocas partículas de especies minerales tienen flotabilidad natural, es decir forman una unión estable burbuja-partícula. Para ello, es necesario cambiar las propiedades superficiales de las partículas minerales de hidrofílicas a hidrofóbicas mediante el uso de un reactivo colector. También es necesario que éstas posean el tamaño adecuado de tal forma que se asegure una buena liberación de las especies minerales. [5]

Hoy día se utilizan tres tipos de celdas de flotación [5]:

- *Mecánicas*: Es el tipo más común, caracterizadas por un impulsor mecánico que agita la pulpa y la dispersa.
- *Neumáticas*: Carecen de impulsor, utilizan aire comprimido para agitar y airear la pulpa.
- *Columnas*: Se caracterizan por tener un flujo en contracorriente de las burbujas de aire con la pulpa y de las burbujas mineralizadas con el flujo de agua de lavado.

Los minerales que flotan se mantienen en una espuma estable en la parte superior de la celda de flotación, de donde son retirados por rebase para formar el concentrado. [5]

Los productos de la flotación contienen habitualmente entre 50% y 70% de sólidos. Gran parte del agua contenida en las pulpas producidas por la flotación es retirada en los espesadores de concentrado y cola, los que realizan simultáneamente los procesos de sedimentación y clarificación. El sólido obtenido en la descarga de los espesadores de concentrado puede contener entre 50% y 65% de sólidos. El agua aún remanente en estos concentrados espesados es posteriormente retirada mediante filtros hasta obtener un valor final entre un 8% y 10% de humedad en el producto final. Este producto es la alimentación para la siguiente etapa. [5]

### 3.5.3.2 VARIABLES DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE FLOTACIÓN

- *Granulometría:* Adquiere gran importancia dado que la flotación requiere que las especies minerales útiles tengan un grado de liberación adecuado para su concentración. [5]
- *Tipo de reactivos:* Los reactivos pueden clasificarse en colectores, espumantes y modificadores. La eficiencia del proceso dependerá de la selección de la mejor fórmula de reactivos. [5]
- *Dosis de reactivo:* La cantidad de reactivos requerida en el proceso dependerá de las pruebas metalúrgicas preliminares y del balance económico desprendido de la evaluación de los consumos. [5]
- *Densidad de pulpa:* Existe un porcentaje de sólidos óptimo para el proceso, que tiene influencia en el tiempo de residencia del mineral en los circuitos de flotación. [5]
- *Aireación:* La aireación permitirá aumentar o retardar la flotación en beneficio de la recuperación o de la ley, respectivamente. El aire es uno de los tres elementos imprescindibles en el proceso de flotación, junto con el mineral y el agua. [5]
- *Regulación del pH:* La flotación es sumamente sensible al pH, especialmente cuando se trata de flotación selectiva. Cada fórmula de reactivos tiene un pH óptimo ambiente en el cual se obtendría el mejor resultado operacional. [5]
- *Tiempo de residencia:* El tiempo de residencia dependerá de la cinética de flotación de los minerales de la cinética de acción de reactivos, del volumen de las celdas, del porcentaje de sólidos de las pulpas en las celdas y de las cargas circulantes. [5]
- *Calidad del agua:* En las plantas metalúrgicas la disponibilidad de agua es un problema. Normalmente se utiliza el agua de recirculación de espesadores que contiene cantidades residuales de reactivos y sólidos en suspensión. [5]

### 3.5.3.3 FLOTACIÓN DEL ORO

La mayoría de los trabajos reportados sobre la flotación de oro, han sido realizados, con el fin de determinar las interacciones oro-colector y la naturaleza de adsorción de los iones de colector en la superficie del oro. Además, algunos trabajos se ha realizado para determinar si el oro puro tiene o no hidrofobicidad natural y por lo tanto, un cierto grado de flotabilidad natural. Aunque algunos trabajos se han realizado sobre las partículas de oro nativo recuperado de depósitos de placer, poca información aparece sobre trabajos realizados con partículas de oro nativo seleccionadas de depósitos de veta, y la flotación de oro nativo ha sido poco estudiada y los mecanismos de hidrofobización son poco conocidos. [17]

La mineralogía de los minerales auríferos y de la ganga acompañante, el tipo de perfil de liberación de los minerales auríferos después de que la mena se somete a procesos de reducción de tamaño y el tamaño de las partículas de oro, constituyen los factores más importantes para determinar el mejor método de procesamiento de un mineral aurífero.

La composición mineralógica de una mena es muy importante, cuando se considera su procesamiento por flotación, tanto desde el punto de vista de los reactivos a emplear como de la configuración de los dispositivos de flotación. Aparte de una adecuada selección del colector, también es importante determinar si cualquiera de los minerales de ganga es susceptible de hidrofobizarse y por lo tanto será necesario considerar el empleo de depresores. [17]

Las menas que contienen oro nativo susceptibles de tratamiento por flotación presentan variadas composiciones mineralógicas y van desde menas de oro libre, hasta menas de metales base donde el oro constituye un componente secundario recuperado como subproducto. Las formas geológicas de ocurrencia incluyen en los depósitos de placer, depósitos hidrotermales y epitermales, material volcánico, rocas sedimentarias y metamórficas y material oxidado y/o meteorizado. [17]

**TABLA 3.12** Menas que presentan contenidos de oro

TIPO DE MENA	FORMA POSIBLE DE PRESENTACIÓN	MINERALES HUÉSPEDES	POSIBLES MINERALES PROBLEMA PRESENTES
Depósito de placer no consolidados	Nativo, con recubrimientos	Ninguno	Arcillas
Oxidados próximos a superficie	Nativo, con recubrimientos	Ninguno	Pirofilita Otras arcillas
Menas Silíceas filoneanas	Nativo, Invisible	Pirita, Arsenopirita	Muy pocos
Oro - Pirita	Nativo, Invisible	Pirita, Arsenopirita, Pirrotita	Pirita que no contiene oro
Oro - Teluro – Pirita	Nativo, Invisible, Teluro	Pirita, Arsenopirita, Pirrotita	Pirita que no contiene oro
Sulfuro monometálico (Cu, Sb, Bi)	Nativo, Invisible	Calcopirita, Bornita, Estibina.	Pirita que no contiene oro y/o Pirita Aurífera
Sulfuro Polimetálico Cu-Pb-Zn-Pirita	Nativo, Invisible	Calcopirita, Galena, Estibina.	Pirita Aurífera
Carbonácea	Nativo, Asociaciones Carbón-Oro	Pirita	Materia Carbonosa

\* Fuente: Bustamante Rúa, Moisés; Tobón Suárez, Claudia (2012)

La flotación es uno de los procesos más importantes en la actualidad, para la recuperación de oro asociado a sulfuros, principalmente a pirita, y se proyecta como uno de los procesos que puede remplazar la amalgamación con mercurio para la recuperación de oro nativo. [17]

La recuperación de oro nativo relativamente grueso (hasta 200 $\mu$ ) por medio de la flotación, ha sido investigada por algunos autores, sin embargo existen algunas imprecisiones respecto al comportamiento hidrofóbico del oro nativo y su relación con la razón de aspecto de algunas partículas auríferas que por su maleabilidad poseen la tendencia a configurarse de forma aplanada (escamas) lo cual provee a las partículas de áreas suficientemente grandes como para alcanzar flotabilidad mecánica en los equipos de recuperación. A manera de ejemplo, es el caso de las partículas de oro aluvial que son naturalmente escamosas y que han sufrido mucha deformación por trabajo mecánico de aplastamiento durante su formación de la roca huésped y transporte hasta la ubicación final del depósito. [17]

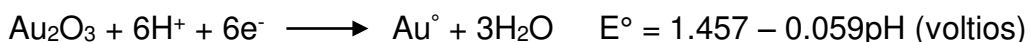
Considerando el hecho de que el oro nativo y el electrum tienen composición variable y diferentes partes de una misma partícula podrían presentar diferentes composiciones, la recuperación por flotación de estas partículas es posible siempre y cuando se resuelva desde el punto de vista de la superficie la heterogeneidad del comportamiento hidrofóbico que genere la recuperación de soluciones sólidas de oro nativo tales como el electrum. [17]

El oro nativo es una aleación de composición no especificada no necesariamente uniforme y de ocurrencia natural que contiene alrededor del 80% al 100% de oro, del 1% al 15 % de plata y entre el 0% y el 5 % de cobre. Por su parte el electrum se definió originalmente como una aleación equi-estequiométrica de oro y plata, pero en el uso corriente significa prácticamente cualquier aleación oro-plata rica en ésta última. [17]

***Los aspectos más importantes en la flotación de oro nativo son:***

***Superficie química del oro y su flotabilidad natural***

En un medio acuoso no-complejante, el oro es no reactivo debido a que los iones de oro y sus óxidos son termodinámicamente inestables, se requieren fuertes condiciones oxidantes para su formación [17]:



La quimisorción de oxígeno sobre el oro inicia a potenciales por encima de los 1.4 Voltios con monocapas de recubrimiento alcanzadas a 2.0 voltios. Lo anterior es atribuido al crecimiento, en soluciones ácidas, de una capa de  $\text{Au}_2\text{O}_3$  y de  $\text{Au}(\text{OH})_3$  en soluciones alcalinas. Los estudios de voltamperometría han determinado que los rangos de estos crecimientos dependen de la orientación de los cristales y las impurezas presentes. El oro puro, de superficies limpias es naturalmente hidrofílico, no obstante, las pequeñas capas de contaminantes carbonáceos, depositadas del aire o soluciones, son suficientes para volverlo hidrofóbico, como resultado de ello el oro es uno de los componentes naturales más hidrofóbico en los sistemas de extracción. [17]

Por otro lado el fenómeno de flotación natural del oro nativo de algunas menas ha sido observado y reportado en la literatura científica, pero no existe acuerdo entre las explicaciones diversas dadas a este fenómeno. Los experimentos con oro electroquímicamente limpios en su superficie mostraron que posee un ángulo de contacto cero en soluciones buffer y ninguna flotación natural en soluciones ácidas o alcalinas. [17]

Se ha encontrado que si el oro forma una aleación con una pequeña cantidad de plata o cobre, la adsorción del colector aumenta significativamente, ya que la plata tiene un efecto positivo sobre la flotabilidad del oro, dado que en presencia de plata, la adsorción de ditiofosfatos y monotiofosfatos (DTPI y MTPI) se indica por la formación de los correspondientes complejos de plata ( $\text{Ag-DTPI}$  y  $\text{Ag-MTPI}$ ) que

pueden ser determinados por espectroscopia IR y que conducen a mejorar las condiciones de flotación. [17]

Afortunadamente casi todo el oro que se obtiene en forma natural contiene plata, normalmente en el intervalo de 2% al 12%, y ésto es suficiente para una buena adsorción de un colector y para la flotación. Cabe añadir que otros elementos como el cobre y el telurio también aparecen frecuentemente asociado al oro nativo y como resultado general, se puede decir que el oro es un mineral que presenta una alta susceptibilidad de ser hidrofobizado selectivamente. [17]

Un aspecto muy importante es la forma de la partícula de oro, este factor afecta a la flotación debido a que las partículas de oro aplanado tienen una mejor área superficial y pueden reaccionar de manera más eficiente con el colector y su acción fijadora es mucho más lenta comparada con pepitas pequeñas o partículas redondeadas. Por ello la acción trituradora tiene dos acciones importantes, liberar las partículas de oro y crear una superficie adecuada para el colector.

El oro nativo también podría adquirir una flotabilidad por contaminación de su superficie con materia orgánica procedente de procesos biológicos naturales, particularmente en menas de placer. [17]

### ***El efecto del tamaño de partícula***

El tamaño de partícula tiene un gran efecto sobre la recuperación de oro mediante flotación debido a su alta densidad. La flotación es efectiva para partículas de oro en el intervalo de 20-200  $\mu\text{m}$ . Para tamaños más finos la selectividad del oro decrece debido a la flotación de minerales ganga. Para tamaños de partícula más gruesos la flotación debe realizarse con altas densidades de la mezcla (35% sólidos) dado que ésto reduce el tamaño de partícula de la sedimentación. [17]

La recuperación disminuye para tamaños pequeños, lo cual se relaciona con la dificultad de adhesión partícula/burbuja, debido a que éstas no adquieren la energía cinética suficiente para producir un agregado partícula/burbuja estable. Por otra parte, las partículas pequeñas son arrastradas más fácilmente a la espuma, ya que el

drenaje a la pulpa se favorece con el incremento de la velocidad de sedimentación. [17]

Es importante destacar que, en la etapa de flotación primaria (etapa “rougher”) la flotación se realiza con una granulometría de mena en la cual no es necesaria la liberación total de las partículas de oro, sin embargo, en la etapa de limpieza donde es necesaria la selectividad de las partículas útiles, es fundamental realizar una remolienda del concentrado de la etapa “rougher” para la liberación de las especies útiles de la mena. [17]

De esta manera, el tamaño de partícula es la variable sobre la cual debe ponerse más énfasis en su control, debido a su efecto en la recuperación metalúrgica y en la selectividad del concentrado final, así como, por la alta incidencia que tiene en los costos de operación del proceso global de concentración. [17]

### ***Selección de colector y dosificación.***

La función del colector es hacer hidrofóbica la superficie del mineral deseado, por lo cual, es el reactivo químico más importante utilizado en la flotación. La amplia experiencia existente en la flotación de minerales permite usar con eficiencia determinados tipos de colectores dependiendo de los tipos de minerales y asociaciones mineralógicas presentes. [17]

Actualmente existen muchos colectores para la flotación de oro nativo y electrum, pero usualmente se prefieren los xantatos y los ditiofosfatos, o mezclas de ellos. En aplicaciones en las que el oro nativo se presenta conjuntamente con oro submicrométrico y en general oro no liberado incluido en sulfuros minerales, la combinación de estos reactivos se ha mostrado eficiente tanto para la recuperación de los sulfuros como del oro nativo; posteriormente puede aplicarse cianuración a los concentrados para obtener el oro. [17]

A pesar del empleo exitoso y ampliamente documentado de los xantatos y ditiofosfatos en la flotación de oro, estudios realizados industrialmente proponen el uso de colectores apolares e insolubles en agua tales como los tiocarbamatos, los mercaptanos y los dialquil



sulfuros y desaconseja el empleo de los colectores primero mencionados, argumentando que los xantatos y los ditiofosfatos rebajan la tasa de flotación de todos los minerales naturalmente hidrofóbicos, entre ellos el oro, además de que requieren mayores dosis para lograr la hidrofobicidad. Una razón adicional para ello, es que el uso de colectores no polares preserva la selectividad en la flotación de las especies naturalmente hidrofóbicas. [17]

Por otra parte otros estudios realizados sugieren que las partículas de oro libre pueden recuperarse muy selectivamente, especialmente contra pirita, manteniendo las superficies del oro limpias de lodos y de especies orgánicas, sin el uso de reguladores de pH y con pequeñas o cero dosis de colectores apolares. [17]

Se debe tener en cuenta, que los reactivos de flotación requieren de un cierto tiempo de acondicionamiento para estar en contacto con la pulpa y de esa forma poder actuar en forma eficiente sobre las especies útiles de la mena. Así, la etapa de acondicionamiento adquiere mucha importancia, ya que algunos reactivos se deben adicionar en la etapa de molienda para tener mayor contacto con la mena, mientras que otros, se adicionan directamente al cajón de descarga de los molinos de bolas o al acondicionador. [17]

Debido a efectos sinérgicos, actualmente, se prefiere trabajar con diferentes reactivos y proporción de los mismos, ya que aseguran que los beneficios de usar una mezcla de colectores se atribuye al incremento en la capacidad de carga de la fase espumante, una cinética más rápida y una recuperación exitosa de partículas intermedias y gruesas. Se infiere que es la interacción entre los componentes del sistema de la mezcla de colectores más que el efecto principal individual es el que domina los beneficios del desempeño, estos a su vez incluyen: el aumento de las recuperaciones y el grado de metal pagado, así como, el incremento en la velocidad del tiempo de recuperación cuando se usan dosis más bajas de reactivos. [17]

**TABLA 3.13** Colectores para la flotación de oro

<b>Composición de colector- colectores individuales</b>	<b>Nombre de Reactivos</b>
Xantato isobutilico de sodio	AERO-317
Xantato amílico de potasio	AERO-343
Formulación de formato de xantogeno	AERO-3758
Di-isobutil dithiofosfato	AERO-3477
Mercaptanobenzothiozalato	AERO-404
Monothiofosfato	AERO-6697
Formulación dithiofosfato	Reactivo S-9810
<b>Composición de colector-mezcla de colectores</b>	<b>Nombre de Reactivos</b>
Formulación dithiofosfato/monothiofosfato	AERO-7249
Formulación monothiofosfato/ dithiofosfato	AERO-8761
Formulación dithiofosfato/monothiofosfato/ dithiofosfinato	Reactivo S-9913
Formulación dithiofosfato/mercaptanobenzothiozalato	AERO-405
Formulación dithiofosfato/mercaptanobenzothiozalato	AERO-7156
Formulación thionocarbamato/dithiofosfato	AERO-3926
Formulación thionocarbamato/dithiofosfato	AERO-473
Formulación modificada thionocarbamato/dithiofosfato	AERO 5744/5
Formulación dicresil dithiofosfato	Reactivo S-8985
Formulación modificada Thionocarbamato/dithiofosfato/monothiofosfato	Reactivo S-9889
Formulación de sulfuro etil octil	Reactivo S-701
Formulación dithiocarbamato/hidrosulfuro de sodio	Reactivo S-3730

\* Fuente: Bustamante Rúa, Moisés; Tobón Suárez, Claudia (2012)

### ***Selección del Espumante***

La elección de un espumante determina las características de la espuma, que contribuye a la selectividad de la operación. Se adicionan con el objeto de [17]:

- 1) Estabilizar la espuma
- 2) Disminuir la tensión superficial del agua
- 3) Mejorar la cinética de interacción burbuja – partícula
- 4) Disminuir el fenómeno de unión de dos o más burbujas (coalescencia).

La altura de la espuma y el flujo de aire a la celda, afectan el tiempo de retención de las partículas en la espuma. La estabilidad de la espuma depende principalmente de la dosificación del espumante. Los espumantes utilizados comúnmente en la flotación de oro nativo y electrum son aceite de pino, ácido cresílico, el MIBC (metil isobutil carbinol) y los oligómeros propileno glicol como el Aerofroth 65; colectores tales como el ditiofosfato líquido proveen también poder espumante a la pulpa mineral. [17]

Las experiencias industriales, aportan a favor del uso de combinaciones de diferentes componentes de espumantes, con el objeto de maximizar la efectividad en la flotación de un amplio intervalo de tamaños de partículas. Éstos establecen que la mezcla de espumantes es ahora una práctica común dependiendo de la fortaleza y compacidad que se requieran en la espuma. [17]

Para la flotación de oro nativo se recomiendan espumantes fuertes y estables.

Un requisito importante de un espumante es que no compita con los colectores disminuyendo la energía libre superficial de las partículas minerales y por lo tanto, si un espumante actuara como colector se reduciría la selectividad del colector en uso. [17]

### ***El Uso de Activadores***

Para la flotación de oro nativo que presenta superficies limpias no se requiere adicionar activadores, no obstante eventualmente puede requerirse activación cuando existen recubrimientos en las partículas de oro u oro asociado con pirita recubierta. En tales casos suele emplearse sulfato de cobre, carbonato de sodio (el cual precipita calcio e iones de metales pesados), sulfuro de sodio en dosis controladas cuidadosamente, y dióxido de azufre. [17]

Los activadores son sales de metales base cuyo ión metálico se adsorbe sobre la superficie de las partículas minerales modificando sus propiedades químicas superficiales; como consecuencia, puede extenderse el intervalo de pH para la flotación mineral, y se incrementan la velocidad de flotación, la recuperación y la selectividad. De otro lado existen ligandos que pueden formar complejos solubles con metales nobles como el oro en soluciones acuosas. Históricamente el ión  $CN^-$  es el ligando usado en la disolución de oro, otros ligandos que cumplen con dichas funciones son aquellos que contienen azufre, halógenos y nitrógeno. Entre éstos, los ligandos que contienen azufre son los más empleados para la recuperación de oro mediante flotación. [17]

### **3.5.4 CIANURACIÓN**

En Octubre 19 de 1887, John Stewart McArthur, R.W. Forrest y W. Forrest descubrieron el proceso de obtención de oro-plata a partir de sus menas mediante la acción disolvente de cianuro. Este proceso el cual se ha nombrado cianuración, recibió uso inmediato en Nueva Zelanda y Sudáfrica. El proceso de cianuración reemplazó al antiguo método de clorinación y desde entonces ha sido uno de los procesos hidrometalúrgicos estándar para recuperar oro y/o plata de sus menas. [19]

### **3.5.4.1 PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN LA DISOLUCIÓN DEL ORO**

Los factores que afectan la disolución del oro son los siguientes [21]:

- Tamaño de la partícula
- Concentración de cianuro
- Concentración de oxígeno
- La temperatura
- La alcalinidad – pH

#### ***Tamaño de partícula***

Cuando en minerales se encuentra oro libre grueso, la práctica usual es separarla por medios gravimétricos, antes de la cianuración, de lo contrario, las partículas gruesas no podrán ser disueltas completamente en el tiempo disponible para llevar a cabo el proceso de cianuración. [21]

Otra práctica para reducir el tamaño de las partículas de oro, es la molienda y clasificación de los minerales de oro en circuito cerrado, donde las partículas de oro grueso son reducidos de espesor y quebrantadas, logrando rebosar del clasificador. [21]

#### ***Concentración de cianuro***

Hay variaciones muy grandes en la fuerza de la solución que provoca la máxima velocidad de disolución del oro, probablemente debido a la variedad de las técnicas empleadas. [21]

Usualmente el factor restrictivo que gobierna la velocidad de disolución del oro es la concentración de oxígeno en la solución en contacto con el oro. [21]

Barsky, Swalson y Heddley comprobaron mediante pruebas realizadas, que la concentración de la solución para una rápida disolución es de 0.05% de NaCN. [22]

**Tabla 3.14** Cantidad de oro disuelto en una hora

<b>NaCN en Solución (%)</b>	<b>Au disuelto en 1 hora (mg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>0.500</b>	2.943
0.250	3.007
0.100	2.986
0.050	3.251
0.025	2.513
0.010	0.338

\* Fuente: Barsky, G; Swainson, S; Hedley, N. (1934)

En la práctica, usan soluciones conteniendo menos de 0.05% de NaCN. dependiendo del resultado de las pruebas metalúrgicas[21].

### ***Concentración de oxígeno***

El uso del oxígeno es indispensable para la disolución del oro, bajo condiciones normales de cianuración. [21]

Múltiples pruebas han demostrado que una adecuada aireación dan buenos resultados como lo hacen los oxidantes químico. [21]

Barsky, Swainson y Hedley, determinaron la velocidad de disolución del oro en soluciones de 0.10% de NaCN, a 25°C usando oxígeno, nitrógeno y mezcla de ambos. [22]

**Tabla 3.15** Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro

<b>Oxígeno (%)</b>	<b>Disolución del Au (mg/cm<sup>2</sup>/hr)</b>
00.0	00.04
09.0	01.03
20.9	02.36
60.1	07.62
99.5	12.62

\* Fuente: Barsky, G; Swainson, S; Hedley, N. (1934)

### ***Temperatura***

El suministro de calor a la solución de cianuro en contacto con oro metálico, produce fenómenos opuestos que afectan la velocidad de disolución. El incremento de la temperatura aumenta la actividad de la solución, incrementándose por consiguiente la velocidad de disolución del oro, al mismo tiempo, la cantidad de oxígeno en la solución disminuye porque la solubilidad de los gases decrece con el aumento de la temperatura. [21]

En la práctica el uso de soluciones calientes para la extracción del oro, resulta desventajosa por el elevado costo, por lo que usualmente, se lixivia a temperatura ambiente. [21]

### ***La alcalinidad de la solución- pH***

El uso de la cal (en solución) para mantener un pH de 10.5 a 11 (alcalinidad protectora) cumple las funciones de [21] :

- Evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis:  $(\text{NaCN} + \text{H}_2\text{O} = \text{HCN} + \text{NaOH})$ , haciendo que la reacción sea favorecida hacia la izquierda.
- Prevenir o evitar las pérdidas de cianuro por acción de dióxido de carbono del aire:  $2\text{NaCN} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2 \text{HCN} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ .
- Neutraliza los componentes ácidos resultantes de la descomposición de los diferentes minerales de la mina en la solución de cianuro.
- Neutraliza los componentes ácidos tales como sales ferrosas, férricas y el sulfato de magnesio contenidos en el agua antes de adicionar al circuito de cianuración.
- Facilita el asentamiento de las partículas finas de modo que pueda separarse la solución rica clara de la mena cianurada.

### 3.5.4.2 MÉTODOS DE CIANURACIÓN DE MENAS DE ORO Y PLATA

Las principales variantes en cianuración son [21]:

- Cianuración por agitación.
- Cianuración por percolación.

#### ***Cianuración por agitación***

Las menas son molidas a tamaños menores a las 150 mallas (aproximadamente tamaño menores a los 105 micrones), es agitada con solución cianurada por tiempos que van desde las 6 hasta las 72 horas, la concentración de la solución cianurada está en el rango de 200 a 800 ppm (partes por millón equivale a gramos de cianuro por metro cúbico de solución), el pH debe de ser alto, entre 10.5 a 11.5 para evitar la pérdida de cianuro por hidrólisis (generación de ácido cianhídrico, HCN, altamente venenoso) y para neutralizar los componentes ácidos de la mena, para evitar lo anterior se utiliza cal, para mantener el pH alcalino, se adiciona lo necesario para mantener la concentración de CaO libre en la solución por encima de 100 gr/m<sup>3</sup>, la velocidad de disociación del oro nativo puede depender entre otros factores, del tamaño del mineral, grado de liberación, contenido de plata, etc., es práctica común remover el oro grueso (partículas de tamaño mayores a 150 mallas o 105  $\mu\text{m}$ ), tanto como sea posible, mediante concentración gravitacional antes de la cianuración, de manera de evitar la segregación y pérdida del mismo en varias partes del circuito, es de suma importancia aparte de determinar la naturaleza de los minerales de oro, poder identificar la mineralogía de la ganga, ya que esta puede determinar la efectividad o no de la cianuración, esto porque algunos minerales de la ganga pueden reaccionar con el cianuro o con el oxígeno, restando de esa manera la presencia de reactivos necesaria para llevar adelante la solubilización del oro. [21]

Se realizan ensayos a escala de laboratorio, con el objeto de determinar las condiciones óptimas para el tratamiento económico y eficiente de la mena. [21]



Las variables a determinar son las siguientes [21]:

- Consumo de cianuro por tonelada de mineral tratado.
- Consumo de cal por tonelada de mineral tratado.
- Óptimo grado de molienda.
- Tiempo de contacto o tiempo de lixiviación.
- Concentración más conveniente del cianuro en la solución.
- Dilución más adecuada de la pulpa.

### ***Cianuración por percolación***

Este método es utilizado para extraer partículas microscópicas de oro desde sus menas, se ha convertido en el proceso más ampliamente utilizado para la extracción de oro y plata en la industria minero metalúrgica, el mineral y roca son removidos de la mina por explosivos luego transportado a la planta para ser triturados a partículas más pequeñas y emplazando en las pilas, previamente compactadas con arcillas o con mantas de polietileno. [21]

La solución de cianuro, la cual disuelve al oro de la mena triturada, es irrigada y percola a través de la pila, la lixiviación puede llevarse a cabo en algunos días o varios meses, dependiendo del tipo de mineral o mena y sobre el procedimiento de lixiviación a emplearse.

La solución enriquecida de oro y plata se colecta sobre el piso impermeable, dispuesto en forma ligeramente inclinada que hace que fluya hacia el tanque de almacenamiento, desde ahí se almacena al circuito de recuperación. [21]

Este circuito de recuperación de oro y plata, desde las soluciones cianuradas diluidas, las que contienen los metales nobles en solución, puede ser de dos tipos:

- Adsorción con carbón activado
- Cementación de oro con zinc

El oro y/o plata que ha sido solubilizado con cianuro se puede recuperar por el sistema de adsorción en carbón activado o por el sistema Merrill-Crowe, el sistema de adsorción en carbón activado no requiere energía eléctrica o adiciones de zinc, y es el método preferido para capturar el oro, esta captura no es una reacción química, sino un

enlace físico relacionado con los microporos en el carbón, este enlace es débil con alcalinidad alta y si la solución preñada se mantiene a pH muy alto, el carbón no captura tanto oro como a un pH más bajo, este enlace se usa para despojar el oro del carbón en el sistema de recuperación. [21]

Los minerales de oro generalmente van acompañados de plata, la cual también se disuelve con cianuro y se recupera junto con el oro, sin embargo, si se utiliza el sistema de recuperación con carbón activado para la recuperación de oro, este puede sobrecargarse fácilmente con plata, bajo estas circunstancias se recomienda el sistema de recuperación Merrill-Crowe como una mejor alternativa, de otro modo, se puede precipitar la plata en una solución de cianuro utilizando sulfuro de sodio a una relación de 8.5 gr de sulfuro de sodio por 1 gr de plata, el sulfuro de plata resultante se precipitará rápidamente en presencia de cal o algún floculante . [21]

Las reacciones químicas que resultan cuando el oro se disuelve en una solución débil de cianuro es que el oro, el cianuro, el oxígeno y el agua se combinan para formar un complejo de oro-cianuro, peróxido de hidrógeno y un radical hidróxido. [21]

En el caso de lixiviación en montones, el pH óptimo está entre 10.5 a 11.5, para tener una lixiviación eficiente, el oro debe de estar libre, con partículas finas que no contengan cianicidas (sulfuros auríferos, calcopirita, malaquita, magnetita, hematita, goethita, covelita, calcosita y marcasita) o impurezas (carbonatos, iones de fierro, níquel, cobre, zinc, manganeso) que pueden destruir el cianuro o inhibir la reacción de disolución. [21]

Durante la reacción debe haber suficiente oxígeno disponible disuelto en la solución de cianuro, este oxígeno se introduce en la solución de cianuro como si fuera rociado sobre el montón, el oxígeno absorbido y el dióxido de carbono del aire también ocasionan pérdidas químicas de cianuro, creando carbonato de sodio y de amonio y cianuro de hidrógeno. [21]

El compuesto de cianuro-oro-oxígeno es estable en un rango de pH, de por lo menos, de 9.5 a 11, un montón ácido consumirá todo el cianuro que se ponga en él, sin embargo, el compuesto oro-cianuro permanecerá en la solución. [21]

La plata también se disuelve en la solución de cianuro y sigue al oro a través del proceso, los minerales de sulfuro de hierro, los cuales son constituyentes comunes de los minerales de oro, se oxidan durante la lixiviación con cianuro, dando como resultado la formación de ácido, estos ácidos se neutralizan por la cal utilizada en la secuencia de lixiviación, los minerales de cobre pueden ser disueltos por la solución de lixiviación y por lo tanto consumir grandes cantidades de NaCN y oxígeno, las concentraciones de cianuro que se utiliza normalmente en la lixiviación en montones se combinan con cantidades de minerales de cobre relativamente grandes, las soluciones débiles de cianuro (1 parte en 10000), se combinan con cantidades mucho menores de estos minerales, esto representa una ventaja cuando se lixivian minerales de oro y cobre, donde la recuperación de oro se evita en una solución débil y el consumo de cianuro es mucho más reducido. [21]

Los minerales que contienen arsénico pueden interferir con la cianuración, los sulfuros de este metal reaccionan rápidamente con cianuro, la arsenopirita tiene un efecto adverso en la lixiviación de oro y la estibinita inhibe la cianuración, los iones de hierro, níquel, cobre, zinc y manganeso retardan la cianuración de oro, en algunos casos los minerales carbonáceos que se encuentran en la naturaleza en minerales de oro de tipo sedimentario, actúan como absorbentes de oro en solución, esta característica conocida como pérdida preliminar, se puede superar mediante la tostación, tratando el mineral con cloruro o utilizando la acción bacteriana. [21]

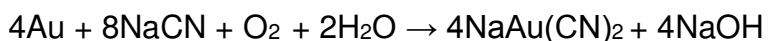
### 3.5.4.3 USO DEL CIANURO EN LA PRODUCCIÓN DE ORO

Una de las razones para el alto valor adjudicado al oro es su resistencia al ataque de la mayoría de los químicos, una excepción es el cianuro o más específicamente, una solución que contiene cianuro y que disuelve el metal precioso, el cianuro se utiliza en minería para extraer oro (y plata) del mineral, en particular mineral de baja ley y mineral que no puede tratarse fácilmente mediante procesos físicos simples como la trituración y la separación por gravedad. [19]

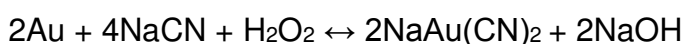
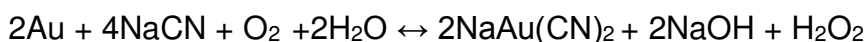
### 3.5.4.4 REACCIONES QUÍMICAS DEL PROCESO DE CIANURACIÓN

Las reacciones entre el cianuro y los metales preciosos han sido propuestas por muchos investigadores, Elsner fue el primero que propuso la reacción química de disolución del oro por cianuros alcalinos. [19]

*Ecuación de Elsner [19]:*



*Ecuación de Bodlander [19]:*



*Ecuación de McArthur-Forrest [19]:*

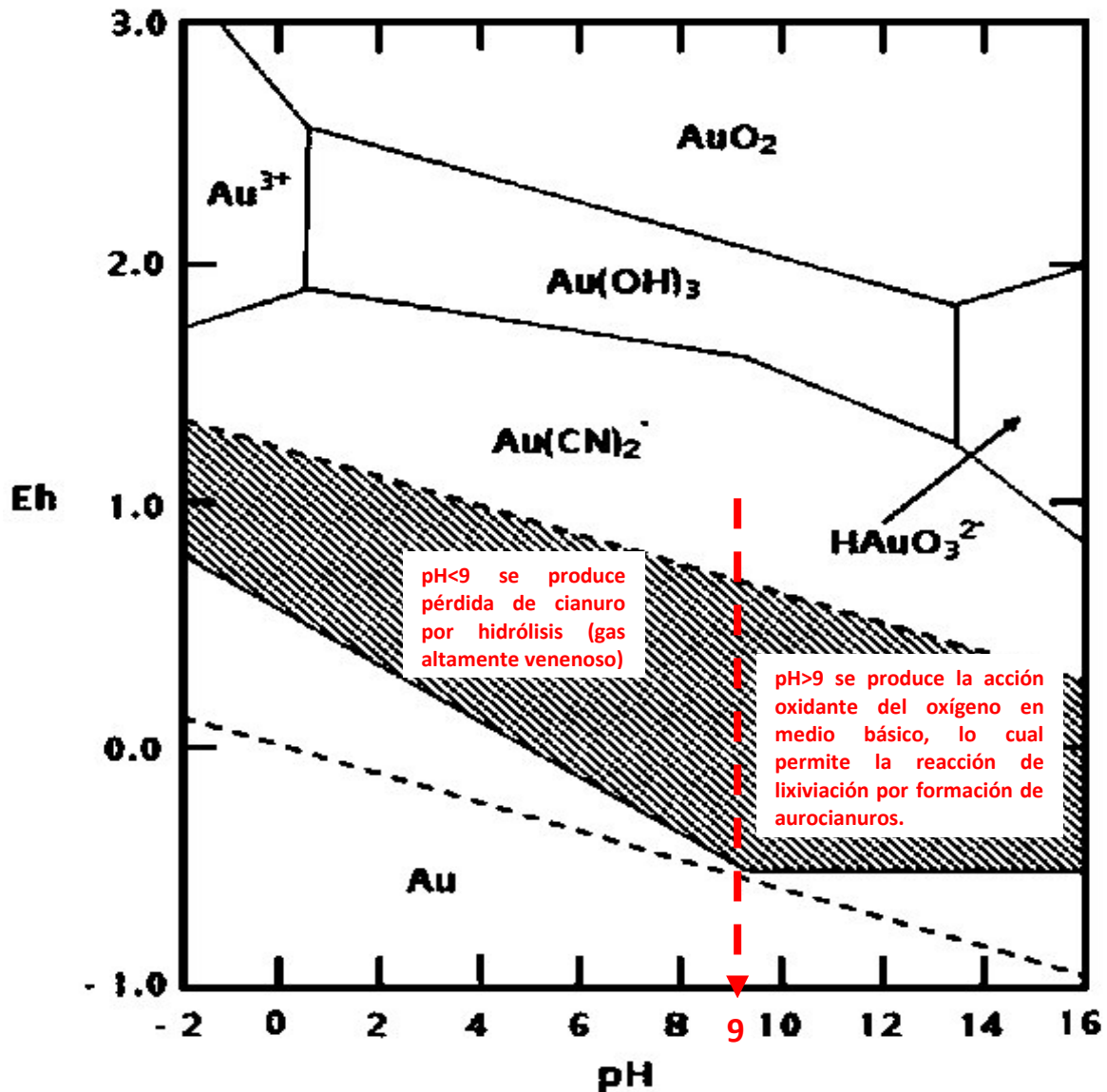


La reacción global de las ecuaciones de Bodlander está dada por la ecuación de Elsner, la cual es universalmente aceptada como la reacción estándar de cianuro y oro. [19]

Termodinámicamente no es posible la ecuación de McArthur-Forrest, porque durante la cianuración no hay producción de  $\text{H}_2$ , esto se concluyó al determinar las energías libres de formación de los iones aurocianuro y a partir de ello, se calcularon los cambios de energía libre de las distintas reacciones químicas sugeridas y finalmente se llegó a la conclusión que la formación de hidrogeno es imposible bajo

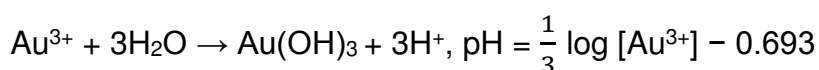
condiciones de una cianuración normal, lo que confirma la validez de la ecuación propuesta por Elsner, donde el  $O_2$  juega un rol fundamental. El comportamiento del sistema de Redox se entiende mejor utilizando los diagramas de Pourbaix, donde las regiones presentan las regiones de estabilidad de las diferentes especies. [19]

FIGURA 3.15 Diagrama de Pourbaix Au-CN-H<sub>2</sub>O

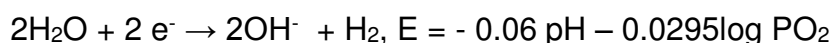
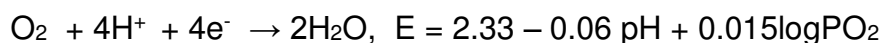


\* Fuente: Misari Ch., Fidel Sergio; Franco Jiménez, Juan Antonio (1993)

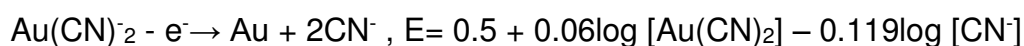
Otra relación que se encuentra involucrada es [18]:



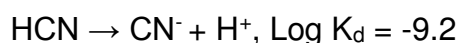
La condición de estabilidad del agua está indicada por las relaciones [18]:



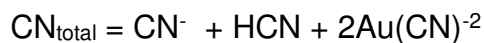
Al construir el diagrama de Pourbaix para el sistema Au – CN – H<sub>2</sub>O, las reacciones que involucran dicho proceso son [18]:



Sabiendo que la concentración del CN<sup>-</sup> es dependiente del pH y del cianuro total, y que el cianuro sufre hidrólisis bajo la reacción [18]:



Por lo tanto, el cianuro total será [18]:



El potencial requerido para el proceso está expresado por [18]:

$$E = 0.5 + 0.06 \log [\text{Au}(\text{CN})_2^-] - 0.118 \log [\text{CN}_t - 2\text{Au}(\text{CN})_2^-] + 0.118 \log [10^{9.2} + [\text{H}^+]]$$

A mayor pH, el potencial es menor, y mayor, el campo de estabilidad del complejo; el potencial de reducción se hace mucho menor que el de reducción del oxígeno. [18]

La adición de cianuro hace disminuir el potencial de reducción del oro, así facilita su disolución a través de todo el rango de pH. [18]

El límite superior de estabilidad del agua (donde O<sub>2</sub>/ OH<sup>-</sup>) es una región oxidante poderosa, que permite la oxidación del oro por lo tanto disuelve o previene la reducción del aurocianuro. [18]

La zona de formación del peróxido de oxígeno, entre el límite inferior y superior de estabilidad del agua, indica que  $O_2/H_2O_2$  promueve la disolución de oro en la solución cianurada. [18]

El campo de estabilidad del complejo aurocianuro está limitado por una recta que inicialmente muestra una pendiente pronunciada (efecto de la hidrólisis del cianuro a pH menor a 9). Esta pendiente se torna luego casi horizontal debido a la acción oxidante del oxígeno en medio básico, lo cual permite la reacción de lixiviación por formación de aurocianuros. En el mismo gráfico se puede observar que los compuestos  $Au(OH)_3$ ,  $Au^{+3}$ , y  $HAuO_3^{-2}$  son reducidos por introducción del cianuro. [18]

#### **3.5.4.5 CINÉTICA DE LA CIANURACIÓN DEL ORO.**

La disolución del oro por cianuración, es un proceso de corrosión electroquímica con reacción heterogénea, ocurrido en la interfase del área anódica y catódica. [19]

La corriente anódica está limitada por la difusión del  $CN^-$  a la superficie, mientras que la corriente catódica está limitada por la velocidad de difusión del oxígeno, donde la velocidad de difusión del oxígeno y del ión cianuro es directamente proporcional a la concentración de ellos en la solución y el aumento, en la agitación para un estado estacionario.

$$C_{\text{corrosión}} = K_{ia} = K_{ic}$$

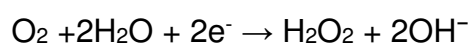
La velocidad de disolución de oro es directamente proporcional a la corriente de corrosión o densidad de corriente. [19]

En base a diferentes estudios, se puede establecer que la velocidad de disolución del oro puede estar controlada por [19]:

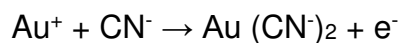
- Velocidad de difusión del oxígeno por capa límite.
- Velocidad de difusión del cianuro.
- Pasivación de la superficie del oro.

- Cuando el proceso está controlado por difusión, la relación de concentraciones  $\text{CN}^-$  a  $\text{O}_2$  es importante.
- A bajas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución depende solamente de ella.
- A bajas concentraciones de oxígeno, la velocidad será proporcional a la concentración de oxígeno e independiente a la concentración de cianuro.
- La velocidad límite teórica se alcanza cuando  $(\text{CN}^-)/(\text{O}_2) = 6$ .
- La reacción que se generan dentro de la celda electroquímica en el proceso de disolución del oro por el cianuro y oxígeno son los siguientes [19]:

Área catódica



Área anódica



De estas 2 reacciones se llega a una conclusión que el oro se disuelve según las reacciones de Elsner y Bodlander, Finkelstein propone que la mayor parte del cianuro se disuelve por la primera ecuación y en menor proporción por la segunda. [19]



## CAPITULO IV

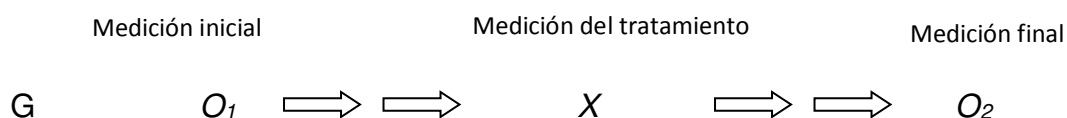
### METODOLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

#### 4.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

En la presente tesis la investigación realizada es experimental, porque utiliza los experimentos y los principios encontrados en el método científico, es decir aplican los conocimientos existentes de la caracterización del mineral, procesos gravimétricos-centrifugación, flotación y cianuración, y estos son aplicados para solucionar los problemas en la recuperación de oro en minerales sulfurados de baja ley.

La investigación también es cuantitativa y deductiva, porque se realizaron la manipulación, análisis e interpretación de las variables independientes y dependientes en cada prueba, tomando como base las teorías basadas en la problemática de la presente investigación.

El diseño de investigación propuesto es la siguiente:



$O_1$ : Procesos convencionales que proporcionan recuperaciones muy bajas de oro en minerales sulfurados de baja ley.

$X$ : Aplicación del proceso en estudio de la presente investigación, para recuperar oro en minerales sulfurados de baja ley, a recuperaciones óptimas.

$O_2$ : Recuperación de oro, en niveles óptimos, en minerales sulfurados de baja ley.

## **4.2 UNIDAD DE ANÁLISIS**

En la presente investigación la unidad de análisis (se refiere, a quien o a quienes se va a aplicar la muestra para efectos de obtener información) se efectuó en la provincia de Casma, departamento de Ancash, ya que es en donde se desarrolla y recopila toda la información (geológica, metalúrgica) utilizada para la presente investigación, teniendo en cuenta también a las comunidades involucradas (aspectos sociales y económicos).

## **4.3 POBLACIÓN DE ESTUDIO**

La población de estudio de la presente investigación es el mineral de cabeza, extraído de la corteza terrestre de la provincia de Casma – Huaraz-Ancash.

Los estudios de la investigación y pruebas metalúrgicas se realizaron en los laboratorios de metalurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM, y la caracterización del mineral, se realizó en la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la UNMSM.

## **4.4 TAMAÑO DE MUESTRA**

En la presente investigación, la cantidad estimada de las muestras para los estudios correspondientes fue de 80 Kg, ya que cada prueba en la preconcentración es de 5 Kg. y además de ello se hicieron 9 pruebas repetibles de la mejor prueba de la preconcentración, manteniendo las mismas condiciones de prueba y con ratios de concentración muy semejantes, con la finalidad de tener suficiente cantidad de concentrado para la cianuración, el resto de la muestra quedó como testigo para las pruebas preliminares que se realizaron.

## **4.5 SELECCIÓN DE MUESTRA**

Una vez obtenido la muestra representativa de 80 Kg. fue trasladado a la sala de muestras donde fue reducido en una chancadora primaria a

una granulometría de 100% -1/4", el cual fue homogenizado y cuarteado, hasta obtener aproximadamente 70 Kg. Después de ello se procedió a la reducción de tamaño en la chancadora secundaria, para obtener el producto final de chancado a nivel de laboratorio de 100% - 10 malla. Dicha muestra fue el alimento a la molienda para realizar las diferentes pruebas metalúrgicas que se realizaron en la presente investigación.

El método que se ha empleado para el cuarteo del mineral, fue el de cuarteo por conos, que es una operación manual, empleada en forma posterior al muestreo, que nos permite continuar disminuyendo la cantidad de muestra, hasta tener una muestra promedio y relativamente representativa de un todo de gran volumen, éste método consiste en formar una pequeña pila con el mineral muestreado, en forma de un cono luego, este se aplanar de una manera uniforme, formando un círculo cónico de una altura muy inferior a la del cono, a este círculo se le divide en cuatro partes simétricas, mediante una cruz concéntrica, luego se separan las 4 partes, para desechar 2 partes opuestas por el vértice y juntar las otras 2 que quedan para formar nuevamente otra pila más pequeña y realizar la misma operación anterior hasta considerar que el producto del último cuarteo contenga una cantidad requerida para las diferentes pruebas metalúrgicas que se realizó.

#### **4.6 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN**

La metodología consistirá en lo siguiente:

- Información bibliográfica sobre la problemática de la investigación.
- Obtener una muestra representativa de mineral de cabeza de la provincia de Casma.
- Después de las operaciones de chancado primario y secundario, tener la muestra representativa con una granulometría de 100%

- 10 malla, que fue alimento a la molienda para realizar las diferentes pruebas metalúrgicas.
- La muestra representativa molida de cabeza de 300 gramos, se envió al laboratorio de análisis químico para el reporte de leyes en oro.
- De la muestra molida de cabeza de 300 gramos, también se envió al laboratorio de Microscopia óptica, para la caracterización y tener como resultado los componentes de la muestra, diferentes tipos de entrelazamientos, tamaño de las partículas y grados de liberación de las especies mineralógicas.
- Pruebas preliminares gravimétricas - centrifugación, como una preconcentración a nivel de laboratorio.
- Pruebas preliminares de flotación del relave de la preconcentración a nivel de laboratorio.
- Pruebas preliminares de cianuración de los concentrados de la preconcentración y de la flotación a nivel de laboratorio.
- Pruebas definitivas gravimétrico – centrifugación.
- Pruebas definitivas de flotación del relave de la preconcentración.
- Pruebas definitivas de cianuración de los concentrados de la preconcentración y de la flotación.
- Sistematizar los resultados obtenidos, mediante balances metalúrgicos.
- Proponer en base a los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, pruebas a nivel de planta piloto.

## 4.7 ANÁLISIS MINERALÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

En la muestra correspondiente al mineral de oro se observó mediante el método de Microscopia Polarizante de Luz Reflejada, para lo cual se confeccionó una briqueta pulida y sobre la cual se realizó previamente la caracterización mineralógica; y a partir de ello se llevó a cabo el análisis modal. En la siguiente tabla se insertan los minerales observados y los que han intervenido en el análisis modal.

**TABLA 4.1** Minerales observados en la muestra

COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA			
MINERALES	FÓRMULA	ABREVIATURA	RELACIÓN
Electrum	(Au,Ag)	el	Fig. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.7, 4.9, 4.10.
Esfalerita	ZnS	ef	Tabla 4.3
Ilmenita	FeTiO <sub>3</sub>	il	Fig. 4.2, 4.3, 4.6, 4.8, 4.9, 4.10.
Pirita	FeS <sub>2</sub>	py	Tabla 4.3
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	hm	Fig. 4.10.
Goethita	FeO.OH	gt	Fig. 4.3, 4.4, 4.5, 4.7, 4.9.
Gangas		GGs	Fig. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10.

\* Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

### 4.7.1 INTERPRETACIÓN MINERALÓGICA

#### **Mineral Aurífero**

Se han observado minerales auríferos tales como el electrum.

Asimismo, tenemos pirita, que por lo común presentan oro, en estado submicroscópico. [6]

#### **Minerales Argentíferos**

No se han observado minerales de plata.

### **Minerales Ferríferos**

Como minerales ferríferos se han observado a la Ilmenita, Pirita, Hematita y Goethita.

### **Minerales Cupríferos**

No se han observado minerales de Cobre.

### **Minerales Zincíferos**

Como mineral de zinc se ha observado a la esfalerita.

### **Otros Minerales**

En este grupo se encuentran las gangas (dentro de éstas están los silicatos y carbonatos).

## **4.7.2 DISTRIBUCIÓN VOLUMÉTRICA Y GRADOS DE LIBERACIÓN**

La distribución volumétrica en este reporte es en término porcentual, del mismo modo con respecto a los grados de liberación; los cuales se proporcionan para todos los minerales que han intervenido en el análisis modal y se pueden observar en el cuadro siguiente:

**TABLA 4.2** Volúmenes y grados de liberación

<b>MINERALES</b>	<b>VOLUMEN (%)</b>	<b>GRADO DE LIBERACIÓN (%)</b>
Electrum	0.86	7.41
Esfalerita	0.06	100.00
Ilmenita	2.93	32.57
Pirita	0.02	0.00
Hematita	0.46	68.97
Goethita	2.12	15.04
Gangas	93.56	92.81
TOTAL	100,00	

\* Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

#### **4.73. INTERPRETACIÓN DEL GRADO DE LIBERACIÓN PARA LOS MINERALES QUE HAN INTERVENIDO EN EL ANÁLISIS MODAL.**

Observando la tabla 4.2, se hará la siguiente interpretación de los grados de liberación de los minerales que han intervenido en el análisis modal:

El electrum ocupa el 0.86% del volumen total de la muestra, de este volumen el 7.41% se halla libre, permaneciendo aun entrelazada el 92.59% restante, el motivo por lo que no se ha liberado totalmente se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos, como se pueden apreciar en la tabla 4.4 correspondiente a la muestra.

La esfalerita ocupa el 0.06% del volumen total de la muestra, de este volumen el 100.00% se halla libre, lo que indica, que de las partículas de este mineral que han intervenido en el análisis modal, todas se hallan libres.

La ilmenita ocupa el 2.93% del volumen total de la muestra, de este volumen el 32.57% se halla libre, permaneciendo aun entrelazada el 67.43% restante, el motivo por lo que no se ha liberado totalmente se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos, como se pueden apreciar en la tabla 4.4 correspondiente a la muestra.

La pirita ocupa el 0.02% del volumen total de la muestra, de este volumen el 0.00% se halla libre, permaneciendo aun entrelazada el 100.00% restante, el motivo por lo que no se ha liberado totalmente se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos, como se pueden apreciar en la tabla 4.4 correspondiente a la muestra.

La hematita ocupa el 0.46% del volumen total de la muestra, de este volumen el 68.97% se halla libre, permaneciendo aun entrelazada el 31.03% restante, el motivo por lo que no se ha liberado totalmente se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los

cuales están inmersos, como se pueden apreciar en la tabla 4.4 correspondiente a la muestra.

La goethita ocupa el 2.12% del volumen total de la muestra, de este volumen el 15.04% se halla libre, permaneciendo aun entrelazada el 84.96% restante, el motivo por lo que no se ha liberado totalmente, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos, como se pueden apreciar en la tabla 4.4 correspondiente a la muestra.

La ganga ocupa el 93.56% del volumen total de la muestra, de este volumen el 92.81% se halla libre, permaneciendo aun entrelazada el 7.19% restante, el motivo por lo que no se ha liberado totalmente, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos, como se pueden apreciar en la tabla 4.4 correspondiente a la muestra.



**TABLA 4.3 Volúmenes y Grados de liberación de los Minerales Observados**

MINERALES			ELECTRUM		ESFALERITA		ILMENITA		PIRITA		HEMATITA		GOETHITA		GANGAS	
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
Total de Partículas Libres	1392		1		1		15		0		5		5		1365	
% Volumen Partículas libres	88.55			0.06		0.06		0.95		0.00		0.32		0.32		86.83
TOT.PARTICULAS ENTRELAZADAS	NUMERO PARTICULAS	VOLUMEN PORCENTUA L	ELECTRUM		ESFALERITA		ILMENITA		PIRITA		HEMATITA		GOETHITA		GANGAS	
			N	% V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
el-gt	15	0.95	7.50	0.48									7.50	0.48		
el-GGs	5	0.32	2.00	0.13											3.00	0.19
il-GGs	105	6.68					31.05	1.98							73.95	4.70
py-GGs	5	0.32							0.25	0.02					4.75	0.30
hm-gt	5	0.32									1.00	0.06	4.00	0.25		
gt-GGs	25	1.59											6.00	0.38	19.00	1.21
el-gt-GGs	10	0.64	3.00	0.19									3.50	0.22	3.50	0.22
hm-gt-GGs	10	0.64									1.25	0.08	7.25	0.46	1.50	0.10
<b>TOTAL ENTREL.</b>	<b>180</b>	<b>11.45</b>	<b>12.50</b>	<b>0.80</b>	-	-	<b>31.05</b>	<b>1.98</b>	<b>0.25</b>	<b>0.02</b>	<b>2.25</b>	<b>0.14</b>	<b>28.25</b>	<b>1.80</b>	<b>105.70</b>	<b>6.72</b>
<b>TOT.LIB+ENLZ</b>	<b>1572</b>	<b>100.00</b>	<b>13.50</b>		<b>1.00</b>		<b>46.05</b>		<b>0.25</b>		<b>7.25</b>		<b>33.25</b>		<b>1470.70</b>	
<b>TOT.VOL.PORCENTUAL</b>		<b>100.00</b>		<b>0.86</b>		<b>0.06</b>		<b>2.93</b>		<b>0.02</b>		<b>0.46</b>		<b>2.12</b>		<b>93.56</b>
<b>GRADOS DE LIB.PORCENTUAL</b>			<b>7.41</b>		<b>100.00</b>		<b>32.57</b>		<b>0.00</b>		<b>68.97</b>		<b>15.04</b>		<b>92.81</b>	
Símbolos :			N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.													
			%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.													

\* Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

**TABLA 4.4 Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa.**

<b>MINERALES ENTRELAZADOS</b>	<b>TIPO ENTR.</b>	<b>NUM. PART.</b>	<b>DIST. PORC.</b>	<b>POSIBILIDADES DE LIBERACIÓN COMPLETA</b>
Partículas Libres		1392	88.55	
el-gt	1bl	5	0.32	Moderadamente fácil
	2bl	5	0.32	Muy difícil
	3dll	5	0.32	Muy difícil a imposible
el-GGs	1bl	2	0.13	Moderadamente fácil
	2bIII	3	0.19	Muy difícil
il-GGs	1al	5	0.32	Fácil
	1bIV	10	0.64	Moderadamente fácil
	1cIII	35	2.23	Imposible
	1dll	10	0.64	Imposible
	1el	10	0.64	Muy difícil a imposible
	3dll	35	2.23	Muy difícil a imposible
py-GGs	1ell	5	0.32	Muy difícil a imposible
hm-gt	1aIII	5	0.32	Fácil
gt-GGs	1al	10	0.64	Fácil
	1el	5	0.32	Muy difícil a imposible
	2al	5	0.32	Muy difícil a imposible
	2bIII	5	0.32	Muy difícil
el-gt-GGs	2cIII	5	0.32	Muy difícil a imposible
	2dIII	5	0.32	Muy difícil a imposible
hm-gt-GGs	2bIII	5	0.32	Muy difícil
	3dIII	5	0.32	Muy difícil a imposible
T O T A L		1572	100.00	

\* Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

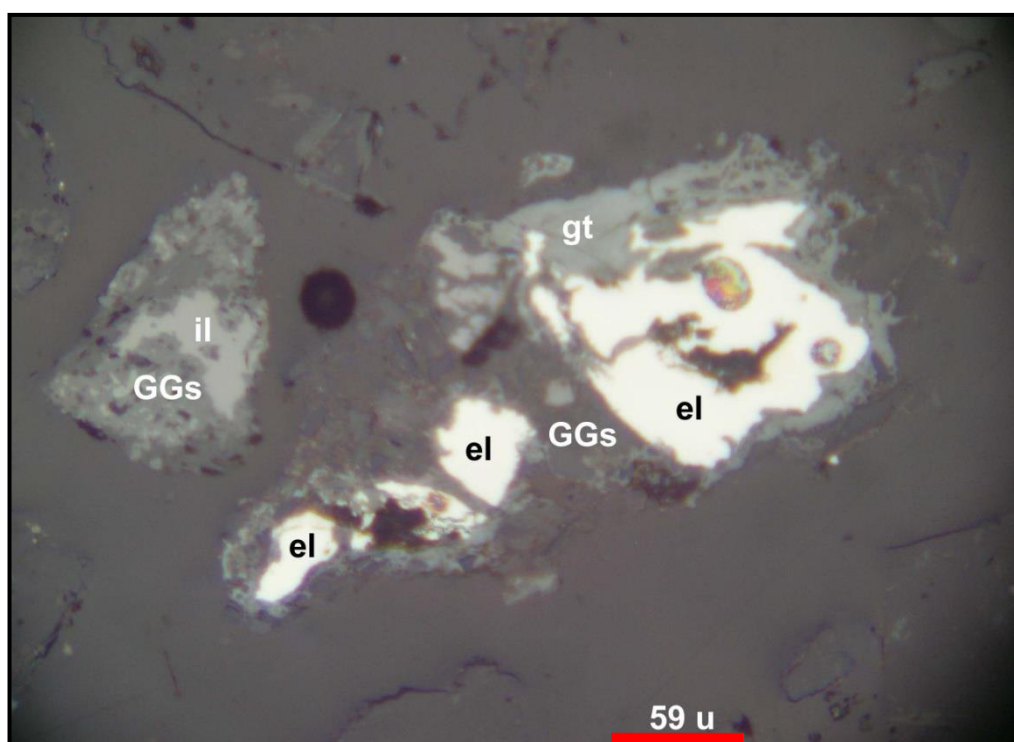


Fig.4.1. Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs), generalmente de tipo geométrico ameboide, moderadamente fácil de liberar. 200X.

\* Fuente Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

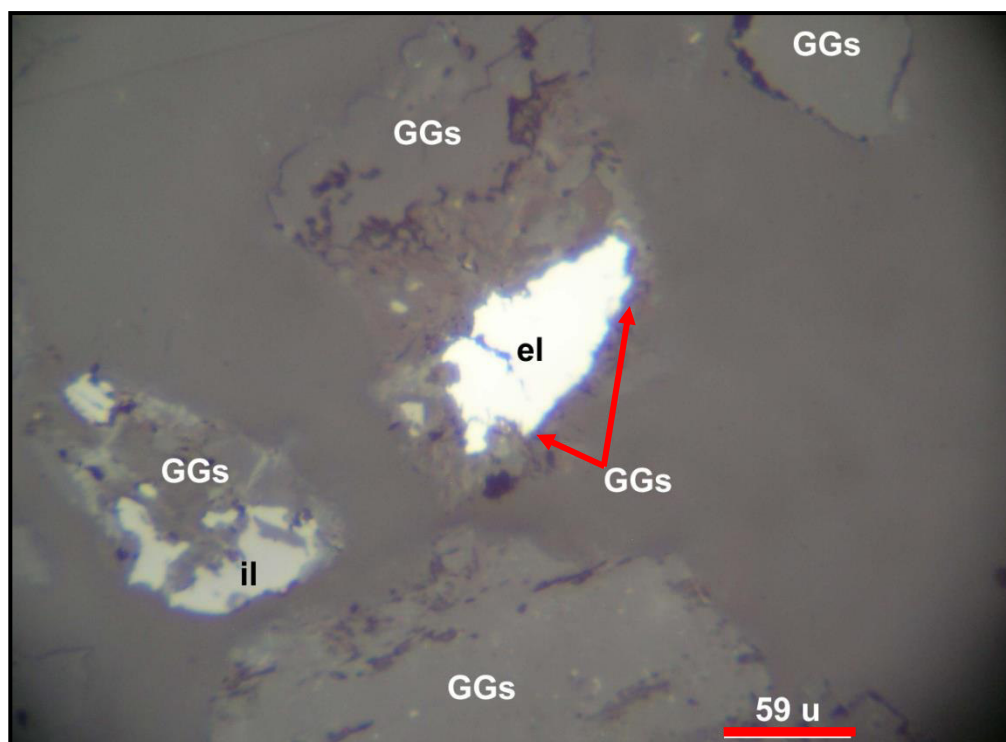


Fig.4.2 Partícula entrelazada de electrum (el) con la ganga (GGs), de tipo geométrico ameboide, moderadamente fácil de liberar. 200X.

\* Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

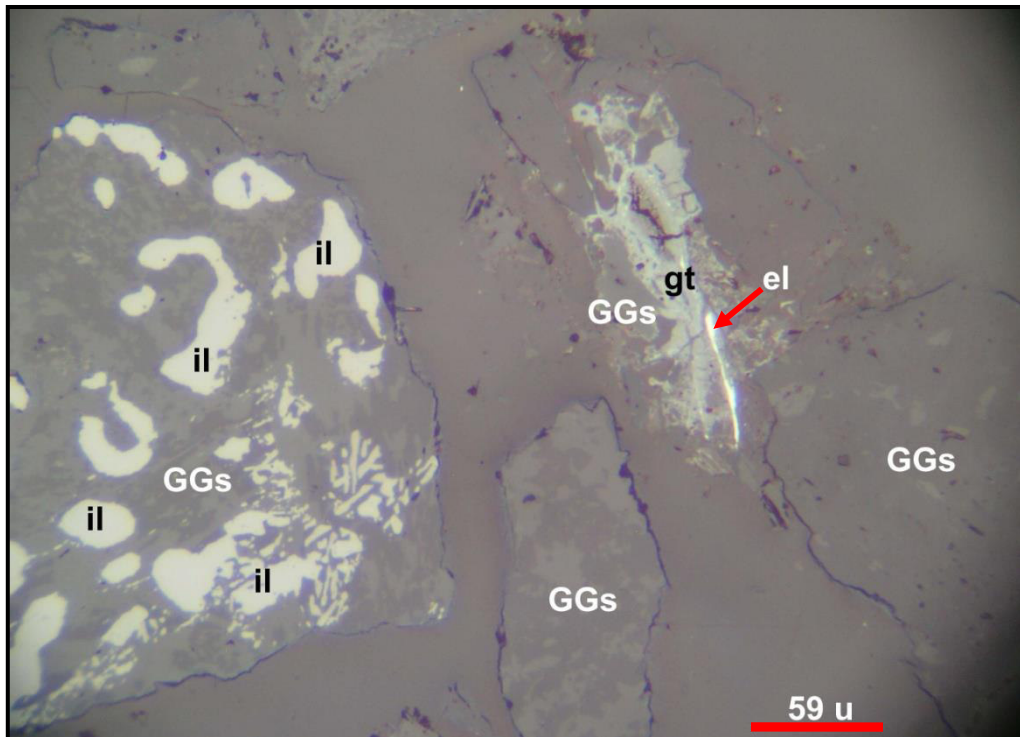


Fig.4.3. Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs); de tipo geométrico coloforme, muy difícil de liberar. 200X.  
 \* Fuente Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

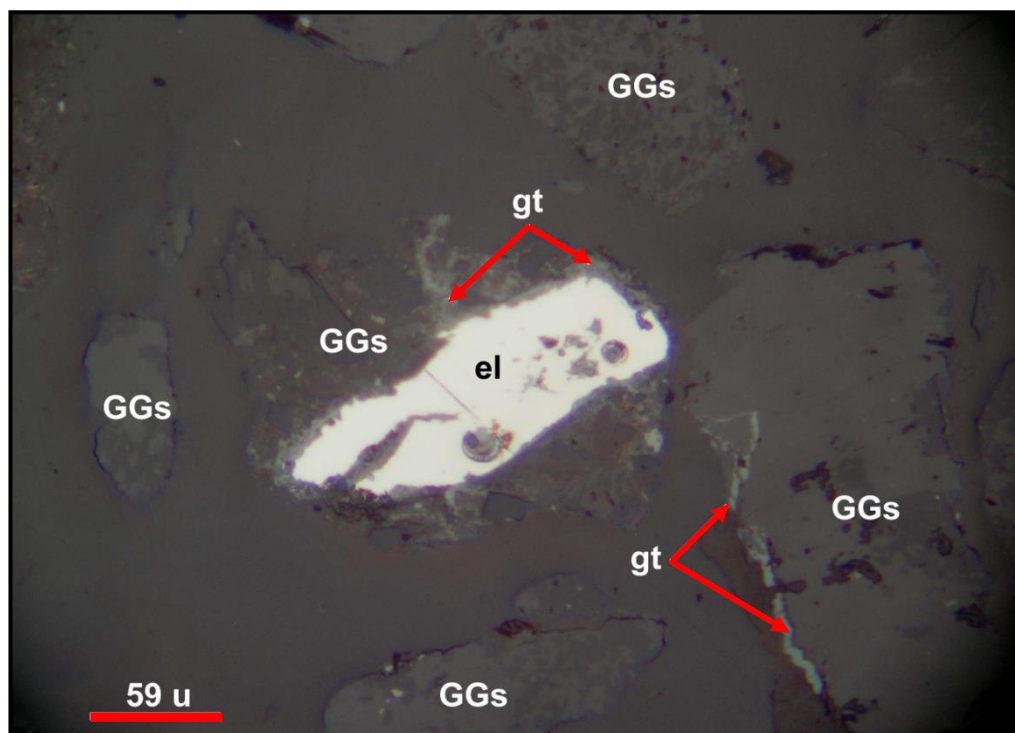


Fig.4.4 Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs); de intercrecimiento concéntrico, muy difícil de liberar. 200X.  
 \* Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)



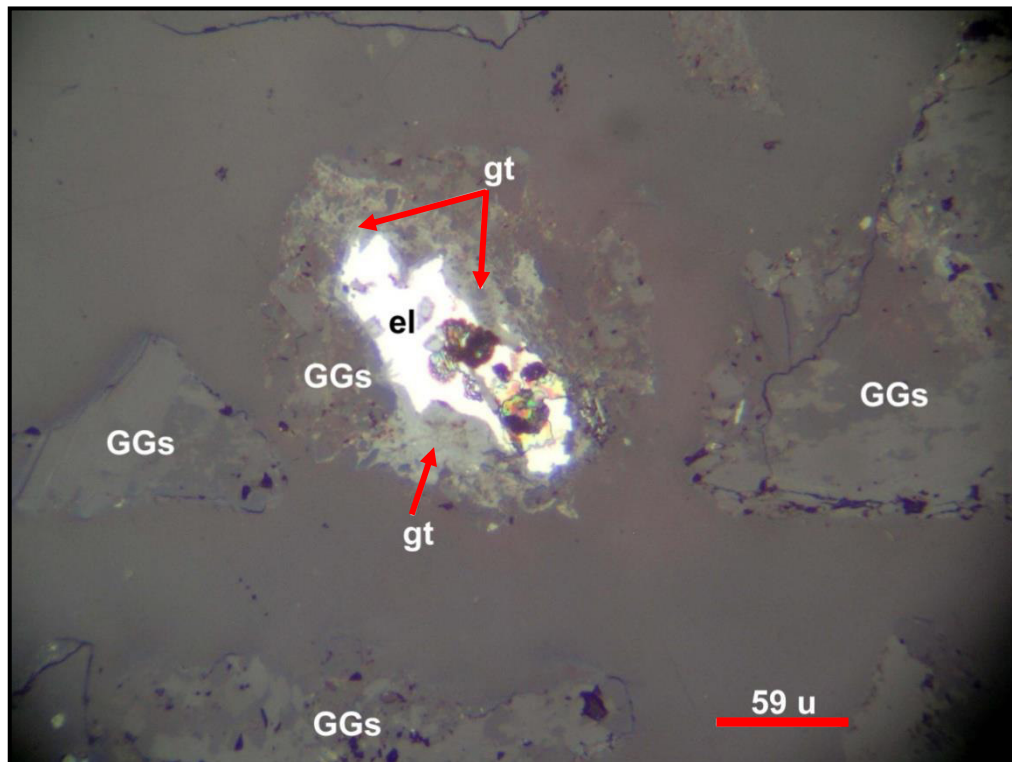


Fig.4.5 Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs); de tipo geométrico coloforme, difícil de liberar. 200X.

\* Fuente Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

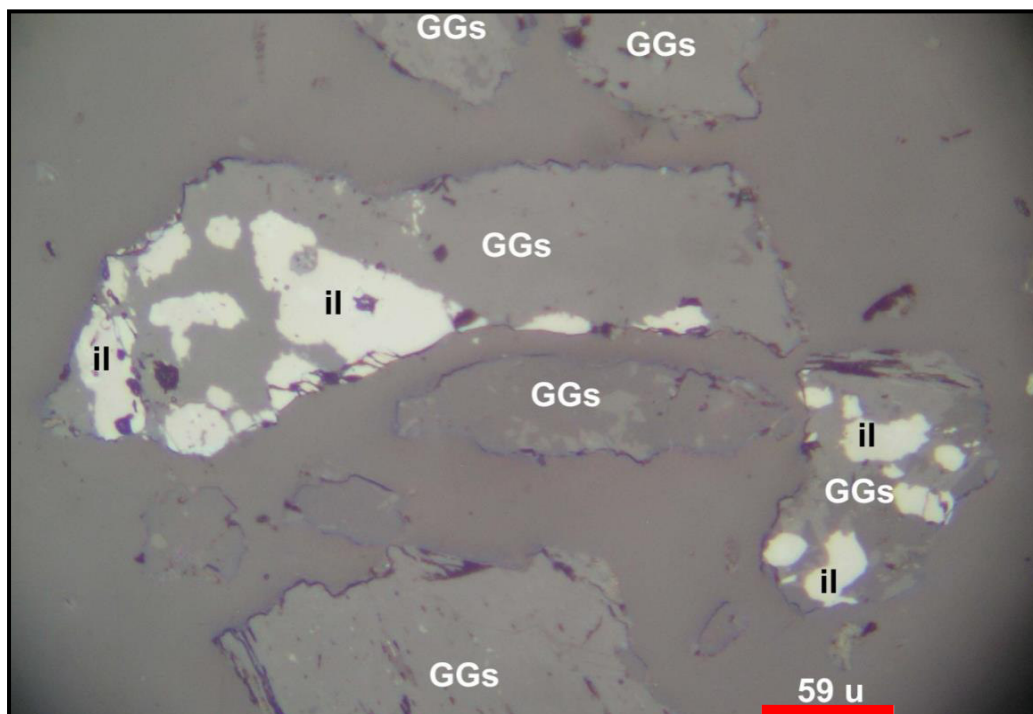


Fig.4.6 Partículas de gangas (GGs) y partículas entrelazadas de ilmenita (il) con la ganga (GGs). 200X.

\* Fuente Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

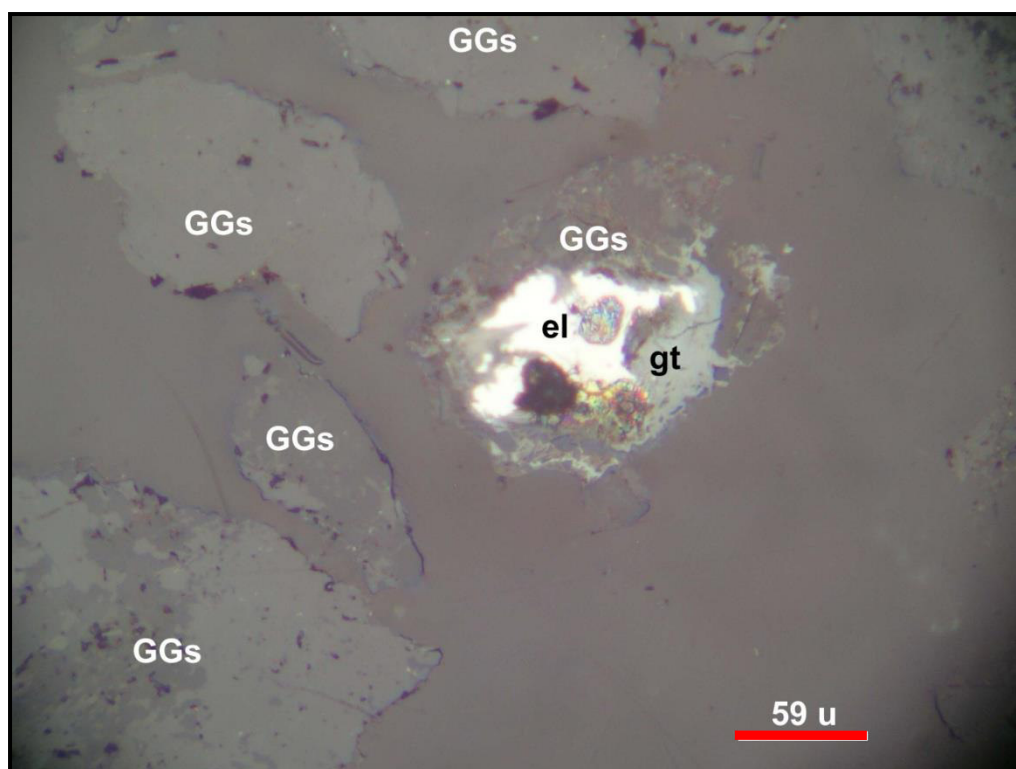


Fig.4.7 Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs); de intercrecimiento concéntrico, difícil de liberar. 200X.

\* Fuente Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

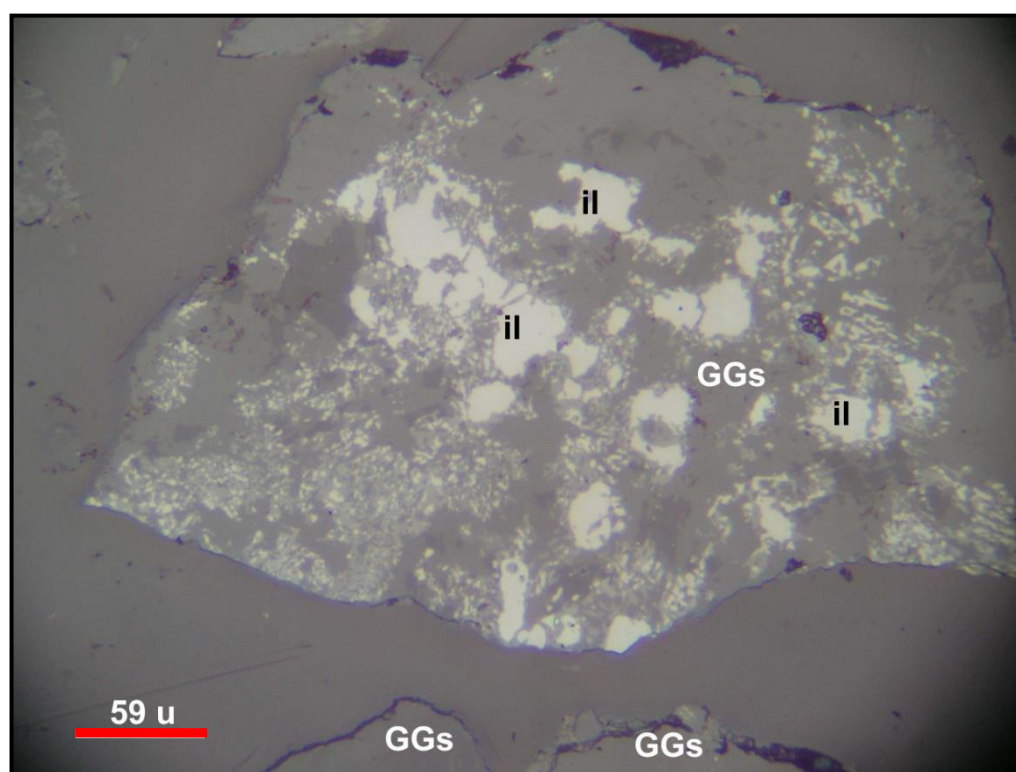


Fig.4.8 Partícula entrelazada de ilmenita (il) con la ganga (GGs). 200X.

\* Fuente Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

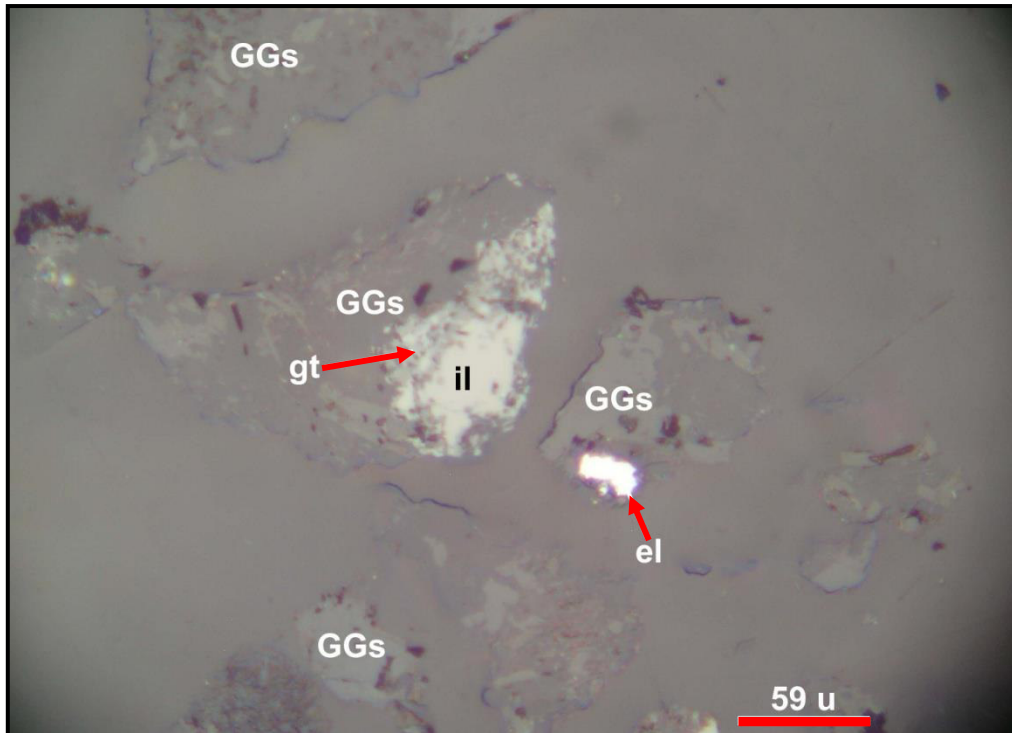


Fig.4.9 Partícula libre de electrum (el), partícula entrelazada de ilmenita (il) con la goethita (gt) y con la ganga (GGs); partículas libres de gangas (GGs). 200X.

\* Fuente Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

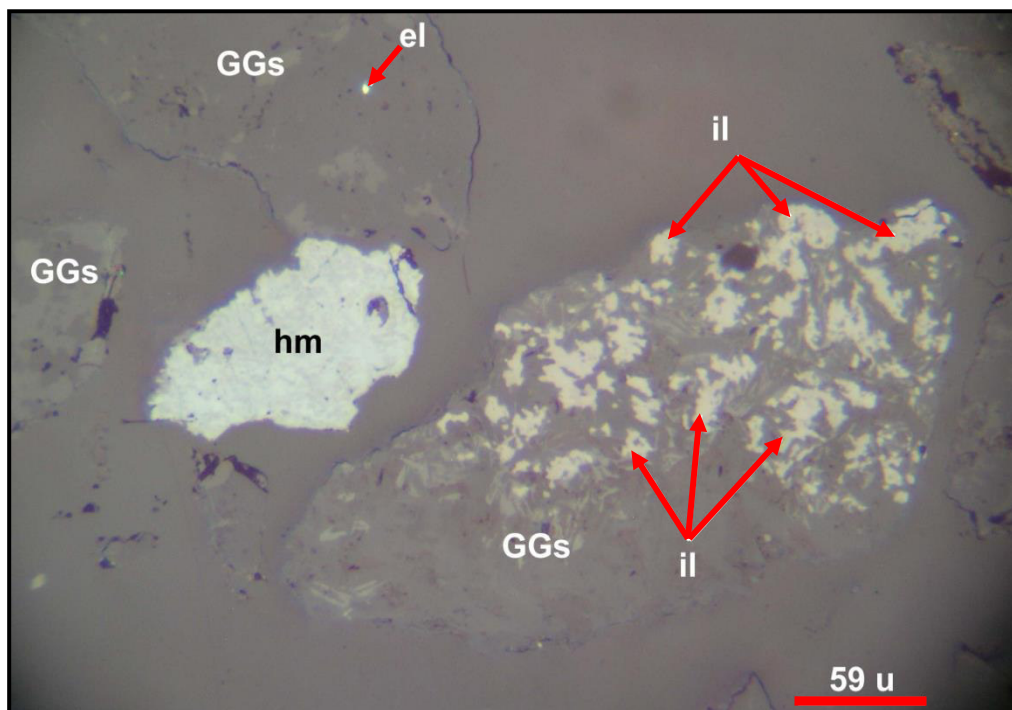


Fig.4.10 Partícula entrelazada de electrum (el) con la ganga (GGs), de tipo geométrico corona, difícil de liberar. 200X.

\* Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2014)

## CAPITULO V

### PRUEBAS EXPERIMENTALES

#### 5.1 PRUEBAS DE PRECONCENTRACIÓN EN EL CONCENTRADOR FALCON

Se realizó la preconcentración utilizando el concentrador Falcon a la pulpa producida en la molienda, esta etapa consiste básicamente en recuperar, por diferencia de gravedad específica global, el oro contenido en el mineral, ya que en este caso no se reporta oro libre, pero si electrum. Para ello es importante que la muestra sea representativa. Además; se considera como variable independiente la granulometría y como variable dependiente, el porcentaje de recuperación de oro.

En la tabla N° 5.1 se presentan las condiciones de operación, y en las tablas N° 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 se presentan los balances metalúrgicos para las distintas pruebas que se realizaron.

##### 5.1.1 CONDICIONES DE LA PRUEBA

**TABLA 5.1** Condiciones de preconcentración en el concentrador Falcon.

<b>Peso de la muestra</b>	5000 g
<b>Fuerza de Gravedad</b>	60 G's
<b>Granulometrías</b>	50.33%,59.45%,67.80%,73.58% -200malla
<b>Presión de agua</b>	3 psi
<b>Densidad de Pulpa</b>	1400 g/lit

\* Fuente: elaboración propia



### 5.1.2 RESULTADOS DE LA PRECONCENTRACIÓN A 50.33% -200m

**TABLA 5.2** Balance metalúrgico del concentrador Falcon a 50.33% -200m.

COMPONENTES	PESO (g)	%PESO	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN	RATIO
			Au (g/TM)	Au	Au	
<b>CABEZA</b>	5000.00	100.00	0.62	62.00	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	141.10	2.82	<b>6.60</b>	18.61	<b>33.51</b>	<b>35.44</b>
<b>RELAVE</b>	4858.90	97.18	0.38	36.93	66.49	
<b>CABEZA CALCULADA</b>			0.56			

\* Fuente: elaboración propia

### 5.1.3 RESULTADOS DE LA PRECONCENTRACIÓN A 59.45% -200m

**TABLA 5.3** Balance metalúrgico del concentrador Falcon a 59.45% -200m.

COMPONENTES	PESO (g)	%PESO	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN	RATIO
			Au (g/TM)	Au	Au	
<b>CABEZA</b>	5000.00	100.00	0.62	62.00	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	133.20	2.66	<b>10.01</b>	26.63	<b>45.33</b>	<b>37.54</b>
<b>RELAVE</b>	4866.80	97.34	0.33	32.12	54.67	
<b>CABEZA CALCULADA</b>			0.59			

\* Fuente: elaboración propia

#### 5.1.4 RESULTADOS DE LA PRECONCENTRACIÓN A 67.80% -200m

**TABLA 5.4** Balance metalúrgico del concentrador Falcon a 67.80% -200m.

COMPONENTES	PESO (g)	%PESO	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN	RATIO
			Au (g/TM)	Au	Au	
<b>CABEZA</b>	5000.00	100.00	0.62	62.00	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	120.20	2.40	<b>16.20</b>	38.88	<b>57.04</b>	<b>41.60</b>
<b>RELAVE</b>	4879.80	97.60	0.30	29.28	42.96	
<b>CABEZA CALCULADA</b>			0.68			

\* Fuente: elaboración propia

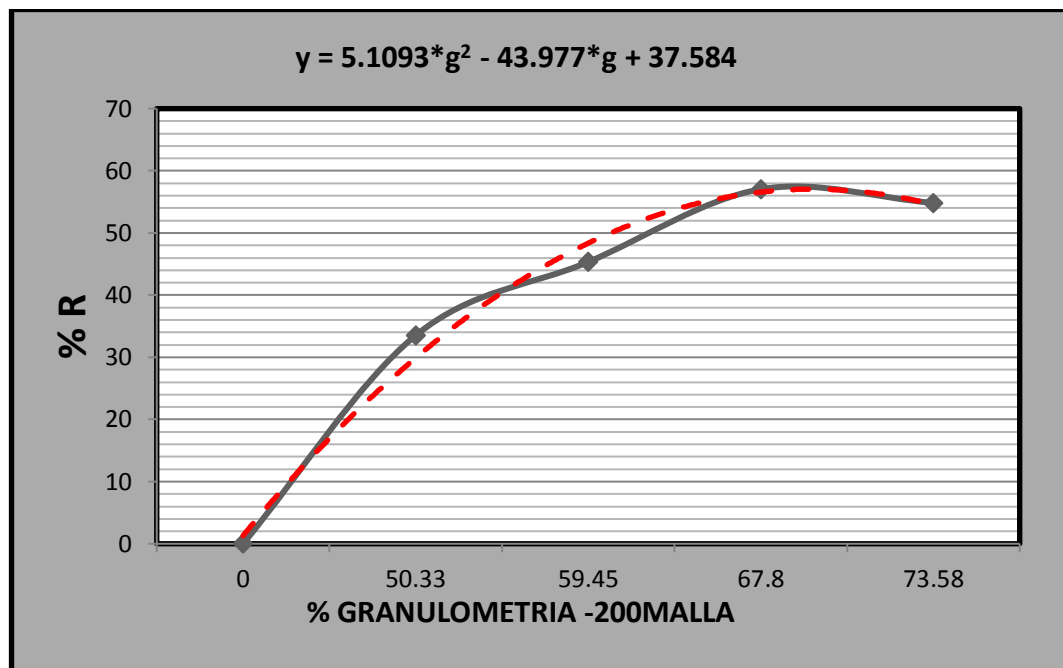
#### 5.1.5 RESULTADOS DE LA PRECONCENTRACIÓN A 73.58% -200m

**TABLA 5.5** Balance metalúrgico del concentrador Falcon a 73.58% -200m.

COMPONENTES	PESO (g)	%PESO	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN	RATIO
			Au (g/TM)	Au	Au	
<b>CABEZA</b>	5000.00	100.00	0.62	62.00	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	123.45	2.47	<b>14.20</b>	35.07	<b>51.40</b>	<b>40.50</b>
<b>RELAVE</b>	4876.55	97.53	0.34	33.16	48.60	
<b>CABEZA CALCULADA</b>			0.68			

\* Fuente: elaboración propia

**FIGURA 5.1** Porcentaje de recuperación en función a la granulometría



\* Fuente: elaboración propia

## 5.2 PRUEBAS DE FLOTACIÓN DE LOS RELAVES DE LA PRECONCENTRACIÓN

Se realizó la flotación del relave de la preconcentración, de la mejor prueba que se obtuvo en el concentrador Falcon (ver tabla 5.4). Esta etapa consiste básicamente en una prueba Rougher, seguida por una flotación cleaner o de limpieza. La finalidad que tiene esta etapa es recuperar el oro de los relaves de la preconcentración y así mejorar la recuperación total del proceso, para ello se consideró como variable independiente la dosificación del colector AR-1208 y como variable dependiente el porcentaje de recuperación del oro.

A continuación en la tabla N° 5.6 se presentan las condiciones de operación, y en las tablas N°5.7, 5.8, 5.9, 5.10 se presentan los balances metalúrgicos para las distintas pruebas que se realizaron.

### 5.2.1 CONDICIONES DE LA PRUEBA

**TABLA 5.6** Condiciones de la prueba en flotación

<b>Peso de la muestra</b>	1000 g
<b>Granulometría</b>	67.80% -200 malla
<b>pH</b>	Natural
<b>Tiempo de acondicionamiento</b>	10 min.
<b>Tiempo de Flotación</b>	6 min.
<b>AR 1242</b>	72.5 g/TM
<b>AR 1208</b>	24.70, 49.40, 74.10, 98.80 g/TM
<b>Z11</b>	36.36 g/TM
<b>MIBC</b>	45.60 g/TM

\* Fuente: elaboración propia

### 5.2.2 RESULTADOS DE LA FLOTACIÓN PARA UN CONSUMO DE 24.70 g/TM DE AR-1208

**TABLA 5.7** Balance metalúrgico de flotación consumo de 24.70 g/TM de AR-1208

COMPONENTES	PESO (g)	%PESO	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN	RATIO
			Au (g/TM)	Au	Au	
<b>CABEZA</b>	1000.00	100.00	0.30	30.00	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	11.10	1.11	<b>9.59</b>	10.64	<b>37.68</b>	<b>90.09</b>
<b>MEDIO</b>	43.20	4.32	3.20	13.82	<b>48.93</b>	
<b>RELAVE</b>	945.70	94.57	0.04	3.78	13.39	
<b>CABEZA CALCULADA</b>			0.28			

\* Fuente: elaboración propia

### 5.2.3 RESULTADOS DE LA FLOTACIÓN PARA UN CONSUMO DE 49.40 g/TM DE AR-1208

**TABLA 5.8** Balance metalúrgico de flotación consumo de 49.40 g/TM de AR-1208

COMPONENTES	PESO (g)	%PESO	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN	RATIO
			Au (g/TM)	Au	Au	
<b>CABEZA</b>	1000.00	100.00	0.30	30.00	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	11.00	1.10	<b>10.58</b>	11.64	<b>44.24</b>	<b>90.91</b>
<b>MEDIO</b>	28.90	2.89	4.08	11.79	<b>44.81</b>	
<b>RELAVE</b>	960.10	96.01	0.03	2.88	10.95	
<b>CABEZA CALCULADA</b>			0.26			

\* Fuente: elaboración propia

## 5.2.4 RESULTADOS DE LA FLOTACIÓN PARA UN CONSUMO DE 74.10 g/TM DE AR-1208

**TABLA 5.9** Balance metalúrgico de flotación consumo de 74.10 g/TM de AR-1208

COMPONENTES	PESO (g)	%PESO	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN	RATIO
			Au (g/TM)	Au	Au	
<b>CABEZA</b>	1000.00	100.00	0.30	30.00	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	11.40	1.14	<b>11.36</b>	12.95	<b>52.13</b>	<b>88.11</b>
<b>MEDIO</b>	27.40	2.74	3.64	9.97	<b>40.14</b>	
<b>RELAVE</b>	961.20	96.12	0.02	1.92	7.73	
<b>CABEZA CALCULADA</b>			0.25			

\* Fuente: elaboración propia

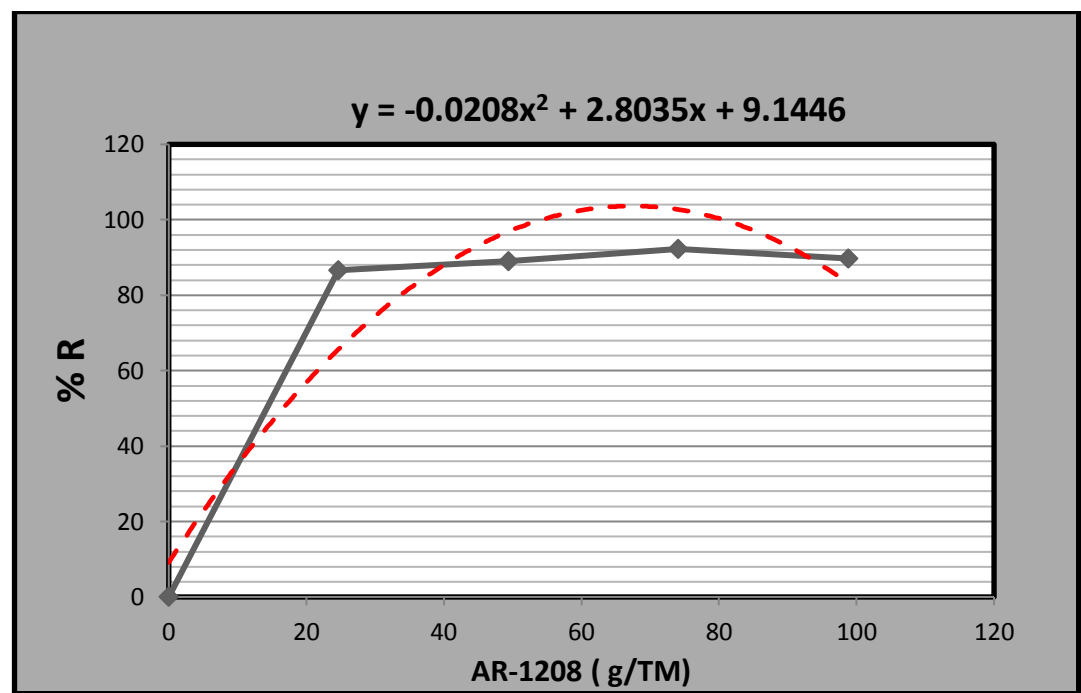
## 5.2.5 RESULTADOS DE LA FLOTACIÓN PARA UN CONSUMO DE 98.80 g/TM DE AR-1208

**TABLA 5.10** Balance metalúrgico de flotación consumo de 98.80 g/TM de AR-1208

COMPONENTES	PESO (g)	%PESO	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN	RATIO
			Au (g/TM)	Au	Au	
<b>CABEZA</b>	1000.00	100.00	0.30	30.00	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	10.90	1.09	<b>10.15</b>	11.06	<b>40.28</b>	<b>91.74</b>
<b>MEDIO</b>	44.50	4.45	3.05	13.57	<b>49.41</b>	
<b>RELAVE</b>	944.60	94.46	0.03	2.83	10.31	
<b>CABEZA CALCULADA</b>			0.27			

\* Fuente: elaboración propia

**FIGURA 5.2** Porcentaje de recuperación en función a la dosificación del colector AR-1208



\* Fuente: elaboración propia

### 5.3 PRUEBAS DE CIANURACIÓN DE LOS CONCENTRADOS DE LA PRECONCENTRACIÓN Y DE LA FLOTACIÓN.

Para las pruebas de cianuración se juntaron los concentrados, de la mejor prueba que se obtuvo en la preconcentración y de la flotación (ver tabla 5.4 y tabla 5.9), estos concentrados fueron remolidos, y con ello se procedió a efectuar pruebas de cianuración en botella a diferentes tiempos (12, 24,36 y 72 hrs), para ello se trabajó como variable independiente, el tiempo de cianuración y como variable dependiente el porcentaje de recuperación de oro.

En la tabla N°5.11 se presentan las condiciones de operación, y en las tablas N°5.12, 5.13, 5.14, 5.15 se presentan los balances metalúrgicos para cada tiempo de cianuración.

#### 5.3.1 CONDICIONES DE LA PRUEBA

**TABLA 5.11** Condiciones de la prueba en cianuración

<b>Peso de la muestra</b>	300 g.
<b>Relación L/S</b>	2/1
<b>Granulometría</b>	80.27% -200 malla
<b>Tiempos</b>	12, 24, 48, 72 hrs.
<b>pH</b>	10.5

\* Fuente: elaboración propia



### 5.3.2 RESULTADOS DE LA CIANURACIÓN A 12 HORAS

**TABLA 5.12** Balance metalúrgico de cianuración a 12 hrs.

COMPONENTES	PESO ó VOLUMEN (ml) ó (g)	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN
		Au (g/TM) ó (mg/lit)	Au	Au
<b>CABEZA</b>	300.00	15.78	47.34	100.00
<b>SOLUCIÓN RICA</b>	600.00	<b>4.80</b>	28.80	<b>71.97</b>
<b>RELAVE</b>	300.00	3.75	11.25	28.09
<b>CABEZA CALCULADA</b>		13.35		

**CONSUMO NaCN: 1.14 Kg/TM**

**CONSUMO CaO : 9.24 Kg/TM**

\* Fuente: elaboración propia

### 5.3.3 RESULTADOS DE LA CIANURACIÓN A 24 HORAS

**TABLA 5.13** Balance metalúrgico de cianuración a 24 Horas

COMPONENTES	PESO ó VOLUMEN (ml) ó (g)	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN
		Au (g/TM) ó (mg/lit)	Au	Au
<b>CABEZA</b>	300.00	15.78	47.34	100.00
<b>SOLUCIÓN RICA</b>	600.00	<b>5.90</b>	35.40	<b>81.94</b>
<b>RELAVE</b>	300.00	2.60	7.80	18.06
<b>CABEZA CALCULADA</b>		14.40		

**CONSUMO NaCN: 1.24 Kg/TM**

**CONSUMO CaO : 9.33Kg/TM**

\* Fuente: elaboración propia

### 5.3.4 RESULTADOS DE LA CIANURACIÓN A 48 HORAS

**TABLA 5.14** Balance metalúrgico de cianuración a 48 Horas

COMPONENTES	PESO ó VOLUMEN (ml) ó (g)	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN
		Au (g/TM) ó (mg/lit)	Au	Au
<b>CABEZA</b>	300.00	15.78	47.34	100.00
<b>SOLUCIÓN RICA</b>	600.00	<b>6.13</b>	36.78	<b>86.95</b>
<b>RELAVE</b>	300.00	1.84	5.52	13.05
<b>CABEZA CALCULADA</b>		14.15		

**CONSUMO NaCN : 1.45 Kg/TM**

**CONSUMO CaO : 9.25 Kg/TM**

\* Fuente: elaboración propia

### 5.3.5 RESULTADOS DE LA CIANURACIÓN A 72 HORAS

**TABLA 5.15** Balance metalúrgico de cianuración a 72Horas

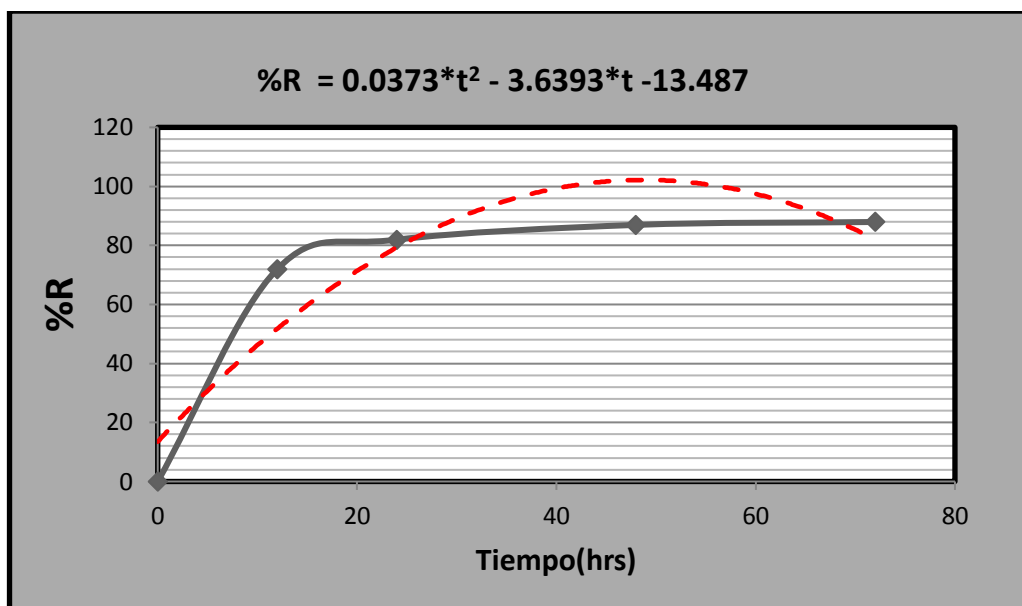
COMPONENTES	PESO ó VOLUMEN (ml) ó (g)	LEY	CONTENIDO FINOS	%RECUPERACIÓN
		Au (g/TM) ó (mg/lit)	Au	Au
<b>CABEZA</b>	300.00	15.78	47.34	100.00
<b>SOLUCIÓN RICA</b>	600.00	<b>6.20</b>	37.20	<b>87.94</b>
<b>RELAVE</b>	300.00	1.70	5.10	12.06
<b>CABEZA CALCULADA</b>		14.10		

**CONSUMO NaCN : 1.65 Kg/TM**

**CONSUMO CaO : 9.40 Kg/TM**

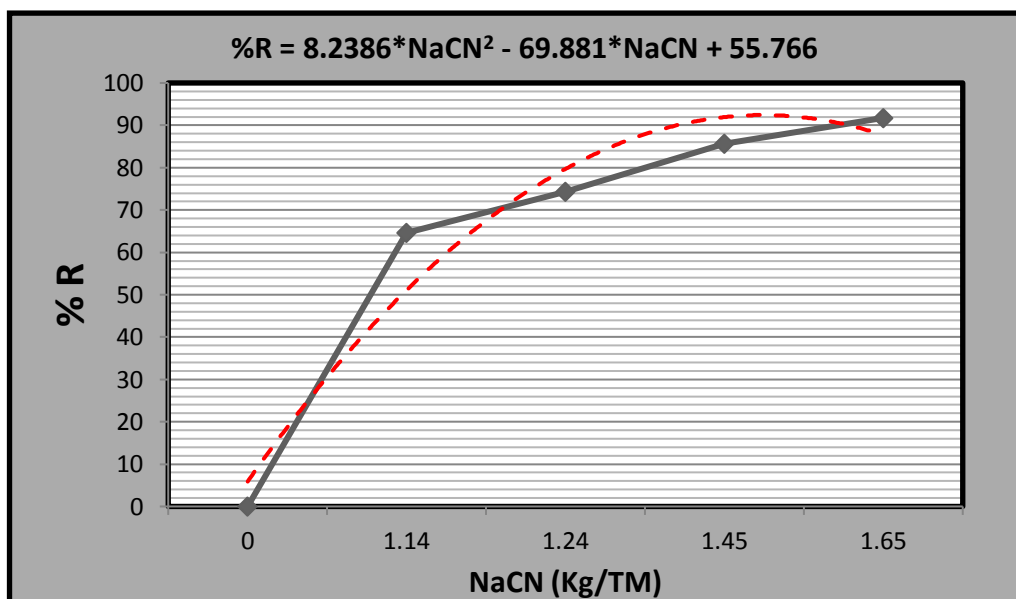
\* Fuente: elaboración propia

**FIGURA 5.3** Porcentaje de recuperación en función al tiempo de cianuración



\* Fuente: elaboración propia

**FIGURA 5.4** Porcentaje de recuperación en función del consumo de cianuro



\* Fuente: elaboración propia

## CAPITULO VI

### INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En la etapa de la preconcentración con el concentrador Falcon, la mejor prueba metalúrgica seleccionada fue la tabla 5.4, donde se obtuvo una calidad del concentrado de 16.20 g/TM, recuperación de oro de 57.04%, radio de concentración de 41.60, cabeza calculada de 0.68 g/TM y con una granulometría de 67.80% -200 malla. Por otro lado a una granulometría más fina, tal como se observa en la tabla 6.1, obtenemos una calidad de relave más alta en comparación con la tabla 5.4, lo que demuestra que a tiempos mayores de molienda, hace tan fino al mineral valioso que lo impide concentrar gravimétricamente desplazándose al relave.

**TABLA 6.1** Resultados de preconcentración en el concentrador Falcon

GRANULOMETRIA (% -200 malla)	LEY Au( g/TM)		% RECUPERACION
	Concentrado	Relave	
50.33	6.60	0.38	33.51
59.45	10.01	0.33	45.33
67.80	16.20	0.30	57.04
73.58	14.20	0.34	51.40

\* Fuente: elaboración propia

De acuerdo a los resultados podemos indicar que los concentradores Falcon, mayormente trabajan como preconcentración, por eso las recuperaciones son bajas, pero los concentrados son bastante aceptables, lo cual indica que el oro se encuentra como partículas muy finas como electrum según la caracterización, asociado a otros minerales sulfurados, como se ha observado en la microscopia óptica.

En la etapa, de la flotación del relave de la preconcentración (tabla 5.4), la mejor prueba metalúrgica seleccionada es la tabla 5.9, donde se obtiene una calidad del concentrado de 11.36 g/TM, recuperación de 92.27% y un radio de concentración de 88.11, para un consumo de 74.10 g/TM de colector AR-1208. Para mayores dosificaciones de colector AR-1208, las recuperación de oro y calidad del concentrado disminuyen, tal como se observa en la tabla 6.2, lo que demuestra que a mayor dosificación del colector AR-1208, genera un efecto negativo en la flotación ya que desplaza la parte valiosa al relave, esto puede ser a causa del exceso del colector, que hace flotar en cantidades excesivas a los materiales indeseables.

**TABLA 6.2** Resultados de Flotación

<b>DOSIFICACIÓN COLECTOR AR-1208 (g/TM)</b>	<b>LEY Au( g/TM)</b>		<b>% RECUPERACION</b>
	<b>Concentrado</b>	<b>Relave</b>	
24.70	9.59	0.04	86.61
49.40	10.58	0.03	89.05
74.10	11.36	0.02	92.27
98.80	10.15	0.03	89.69

\* Fuente: elaboración propia

En la etapa de la cianuración de la mezcla de los concentrados de la tabla 5.4 y tabla 5.9, previamente son remolidos a una granulometría de 80.27% -200 malla, en la tabla 6.3 se puede apreciar que la cinética de extracción es rápida dentro de las 48 hrs. para el oro, llegando a 86.95% de recuperación, después de las 48 hrs. la cinética de extracción es casi constante, presentando la mayor recuperación, para esta investigación, a las 72 hrs. con 87.94% de recuperación, con un consumo de cianuro de 1.65 Kg/TM.

**TABLA 6.3** Recuperación del oro en función al tiempo de cianuración

TIEMPO (hrs)	% RECUPERACIÓN Au
12	71.97
24	81.94
48	86.95
72	87.94

\* Fuente: elaboración propia

Finalmente, la variable independiente seleccionada en la preconcentración es a una granulometría de 67.80% -200 malla, para obtener una recuperación de 57.04%, por otro lado, en la flotación la variable independiente seleccionada es la dosificación del colector AR-1208 a 74.10 g/TM para obtener una recuperación de 92.27% y en la cianuración la variable independiente seleccionada es el tiempo de cianuración a 72 hrs, para obtener una recuperación de 87.94%. Obteniéndose una recuperación total de 85.02% de oro.

## **CAPITULO VII**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **CONCLUSIONES:**

- Es posible obtener una recuperación bastante aceptable con los procesos combinados de gravimetría – centrifugación, flotación y cianuración para minerales sulfurados de baja ley de la provincia de Casma.
- Los resultados de la caracterización de la muestra del mineral estudiado indicó un tipo de oro electrum que tiene una distribución volumétrica de 0.86% y 7.41% de grados de liberación.
- Los tipos geométricos de entrelazamientos de las especies mineralógicas observados en la caracterización, a malla -200, indicaron que los enlaces referidos al electrum son posibles de liberar.
- La mejor prueba seleccionada en la preconcentración, con el concentrador Falcon es con una granulometría de 67.80% -200 malla, como variable independiente, obteniéndose una calidad de concentrado de 16.20 gr/TM, y 57.04% de recuperación que es la variable dependiente. Esto es debido a que a tiempos mayores de molienda, hace tan fino al mineral valioso que lo impide concentrar gravimétricamente desplazándose al relave.
- En la flotación del relave de la preconcentración, la mejor prueba seleccionada es a una granulometría de 67.80% -200 malla, calidad de concentrado de 11.36 g/TM y una dosificación del colector AR-1208 de 74.10 g/TM, que es la variable independiente, obteniéndose una recuperación óptima de 92.27%, como variable dependiente. A mayores dosificaciones

del colector, genera un efecto negativo en la flotación ya que desplaza la parte valiosa al relave, esto puede ser a causa del exceso del colector.

- Remoliendo los concentrados de la preconcentración y de flotación a una granulometría de 80.27% -200 malla, con 72 horas de cianuración, como variable independiente, se llega a una recuperación de oro de 87.94%.
- El proceso metalúrgico adecuado de acuerdo a los resultados de la investigación de la tesis, para la recuperación de oro de minerales sulfurados de baja ley de la provincia de Casma, es una preconcentración con el concentrador Falcon, seguido de una flotación de los relaves de la preconcentración y por último remoler los concentrados de la preconcentración y de flotación y realizar el proceso de cianuración, para obtener una recuperación total de 85.02% de oro, como variable dependiente.



## RECOMENDACIONES:

- Se recomienda que el proceso metalúrgico estudiado en esta investigación (preconcentración, flotación y cianuración) sirva como alternativa para obtener recuperaciones óptimas de oro en minerales sulfurados de baja ley, promoviendo la explotación de yacimientos que actualmente no son explotados porque los resultados metalúrgicos no son alentadores por la baja ley de oro que poseen y por otra parte reducir la contaminación ambiental por el no uso del mercurio.
- Evaluar el comportamiento del mineral en estudio, en otros equipos de concentración gravimétrica como K-Nelson, Jigg, Mesa vibratoria, etc. para tener otras alternativas de recuperación, en donde no se tenga disponibilidad del concentrador Falcon.
- Se recomienda realizar pruebas a nivel pilotaje, con los resultados obtenidos de la presente tesis, realizando el escalamiento de las variables para un proceso continuo.
- Caracterizar los relaves de la flotación, de la preconcentración y de la cianuración, para identificar la presencia de oro y así mejorar la recuperación, mediante ajuste de variables en los procesos metalúrgicos.
- Evaluar el efecto de molienda que tendría en los relaves de la preconcentración sobre la recuperación de oro en el proceso de flotación.
- Evaluar el efecto de los tiempos de molienda para la recuperación de oro en la cianuración de los concentrados de la preconcentración y flotación.
- Realizar pruebas metalúrgicas comparativas con respecto a reactivos sustitutos al cianuro (ver anexo 4), que en otros casos se comportarían, medioambientalmente, más amigables.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Guillermo Zabaleta, Alonso (2000). *El oro: comercio, obtención y aplicaciones*. 2nd ed. Madrid, España: Sociedad Española de Metales Preciosos. 184 p.
2. Ojeda Escamilla, Carmen; Reyes Bahena, Juan L. (2006) *Recuperación de metales preciosos provenientes de Presa de Jales*. En: Encuentro sobre procesamiento de minerales, 13. San Luis Potosí, 11-13 Octubre 2006. *Trabajos de Investigación*, San Luis Potosí, Bolivia: Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 10p.
3. Marsden, John; House, Lain. (1960) *The Chemistry of Gold Extraction*. 2nd ed. Colorado, EE.UU: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. 350 p.
4. Villas C., Roberto; Sánchez, Mario. (2006) *Tecnologías Limpias en las Industrias Extractivas Minero-Metalúrgicas y Petrolera*. 2nd ed. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: CYTED-CETEM. 352 p.
5. Castillo Migone, Jorge. (2014) *Programa Integral Concentración de Minerales*. Lima, Perú: Tecsup. 120 p.
6. Hulburt Cornelius. (1986) *Manual de Mineralogía de Dana*. 4ta ed. Madrid, España: Editorial Reverte. 578 p.
7. Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel (2012). *Análisis del mercado del oro: Variables relevantes y modelo de estimación del precio*. Barcelona, España: Universidad Pompeu Fabra. 86 p.
8. Ministerio de Energía y Minas del Perú (2016). *Anuario Minero 2015: Estadística Minera, Producción y Exportaciones*. Lima: Dirección de Producción Minera.

9. Luna Córdova, Henry. (2016) Desarrollo de la Minería Aurífera y Argentífera en el Perú. *Desde Adentro*, 152. pp.41-50.
10. Arias Minaya, Luis A. (2015); *Marco Macroeconómico Multianual 2016-2018*. En: Sesión de Consejo de Ministros. Lima, Perú. *Proyecciones*. Lima, Perú: Ministerio de Economía y Finanzas del Perú. pp. 15-25.
11. Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio (2012). *Pruebas experimentales a nivel de laboratorio de concentración gravimétrica y flotación de minerales de oro en la planta concentradora Caselita en Condoroma - Cuzco*. Tesis (Ingeniero Metalurgista y de Materiales). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. 93 p.
12. Alvarez Q., Armando. (2006) *Tecnología de la concentración centrífuga*. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés. 100 p.
13. Ken Smith (2005). *Manual del Falcon Concentrators*. Australia.
14. Sepro Mineral Systems Corp. (2011) *Concentradores Falcon (SB) Semi Lote*. British Columbia, Canadá. 2 p.
15. Sepro Mineral Systems Corp. (2011) *Concentradores Falcon Continuos (C)*. British Columbia, Canadá. 2 p.
16. Sepro Mineral Systems Corp. (2011) *Concentradores Falcon para Ultra Finos (UF)*. British Columbia, Canadá. 2 p.
17. Bustamante Rúa, Moisés; Tobón Suárez, Claudia. (2012) *Estudio de hidrofobicidad del oro nativo*. Medellín, Colombia: Dyna, vol.79, núm. 175. pp. 48-80
18. Misari Ch., Fidel Sergio; Franco Jiménez, Juan Antonio. (1993) *Metalurgia del Oro*. Lima, Perú: Centros de estudios y promoción en ciencias de la tierra. Vol. 2.

19. Dominic Mihovilovic, Esteban; Sánchez F., Mario; Correa C., Héctor. (2006) *Manual General de Minería y Metalurgia*. Santiago, Chile: Portal Minero Ediciones. 403 p.
20. Cano, Oscar; Norabuena, Gerardo. (2007) *Mejoramiento de la gestión integral de residuos sólidos municipales de la ciudad de Casma*. Ancash, Perú: Gobierno local provincial de Casma. pp. 5-6
21. Vesga Rueda, Diego Armando (2010). *Evaluación de la disolución de oro del mineral de la Mina San Pablo, ubicada en el Municipio de remedios Antioquia, Mediante cianuración con agitación mecánica*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. 77 p.
22. Barsky, G; Swainson, S; Hedley, N. (1934) *Disolución de oro y plata en soluciones cianuradas*. Trans. AIME 112, (1934), 677 p.
23. Taggart, Arthur H. F. (1966). *Elementos de preparación de minerales*. España, Madrid: Ediciones Interciencia. 648 p.
24. Vidal Sixto, Aramburú R. (2015). *Proceso innovador para mejorar la recuperación de oro y reducir la contaminación ambiental en la minería artesanal*. Tesis (Doctor en Gestión de Empresas). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. pp. 6-7
25. Palomino Hidalgo, Ángel; Ramos Ledesma, Oscar. (2008). *Evaluación en la recuperación del oro y la plata a partir de minerales sulfurados en una matriz de cuarzo*. Tesis (Ingeniero Metalúrgico). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. pp. 101-107

# **ANEXOS**

## ANEXO 1

### ESPECIFICACIONES CONCENTRADORES FALCON (SB) SEMI LOTE

MODELO	UNIDADES	L40	SB400	SB750	SB1350	SB2500	SB5200
CAPACIDAD RECOMENDADA DE SOLIDOS*	t/h	0-0,25	1-15	10-80	50-150	100-250	200-400
CAPACIDAD MÁXIMA DE PULPA	m <sup>3</sup> /hr	2,3	30	100	200	300	450
AREA DE SUPERFICIE DE CONCENTRACION	m <sup>2</sup>	0,03	0,21	0,46	1,08	2,14	3,37
RANGO DE FUERZA G	Superior	200	150	200	200	200	200
	Inferior	50	100	50	50	50	50
PESO DE LA MAQUINA	Kg	35	485	1250	2900	4560	6900
POTENCIA DEL MOTOR	kW(HP)	0,4(0,5)	3,7(5,0)	7,5(10)	18(25)	45(60)	75(100)
CONSUMO DE AGUA DEL PROCESO	m <sup>3</sup> /hr	0,24-1,2	3-5	8-12	12-20	15-28	25-35
PRESION DE ABASTECIMIENTO DE AGUA	Bar	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
TAMAÑO MAXIMO DE PARTICULAS RECOMENDADO PARA ALIMENTACIÓN	mm	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
TAMAÑO ABSOLUTO MÁXIMO DE PARTICULAS PARA ALIMENTACIÓN*	mm	1,5	2,5	4,0	4,0	4,0	4,0
PORCENTAJE MAXIMO DE SOLIDOS PARA ALIMENTACIÓN*	%	55-70	65	55-70	55-70	55-70	55-70
VOLUMEN DE DESCARGA DE LODO CONCENTRADO*	lt	1	25	100	150	250	350
VOLUMEN DE DESCARGA CONCENTRADO DE SOLIDOS*	cm <sup>3</sup>	120	1230	5275	12425	18750	24050
DIMENSIONES	m	0,49	1,02	1,71	2,24	2,67	3,19
	m	0,31	1,00	1,44	1,90	2,00	2,32
	m	0,51	1,43	1,50	2,07	2,27	2,73

\* Fuente: Sepro Mineral Systems Corp. (2011)

### ESPECIFICACIONES CONCENTRADORES FALCON CONTINUOS (C)

MODELO	UNIDADES	C400	C1000	C2000	C4000
CAPACIDAD RECOMENDADA DE SOLIDOS*	t/h	1-5	5-27	20-60	45-100
CAPACIDAD MÁXIMA DE PULPA	m <sup>3</sup> /hr	17	74	210	400
TAMAÑO MAXIMO DE ALIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS*	mm	1,0	1,0	1,0	1,0
MÍNIMO TAMAÑO DE CAPTURA EFECTIVA	µm	10	10	10	10
SÓLIDOS EN PORCENTAJE DE CONCENTRADO	%	65-72	65-72	65-72	65-72
SÓLIDOS EN PORCENTAJE DE MAXIMA ALIMENTACIÓN	%	40-45	40-45	40-45	40-45
AREA DE SUPERFICIE CONCENTRADA	m <sup>2</sup>	0,25	0,60	1,42	2,64
RANGO DE FUERZA G	Superior	300	300	300	300
	Inferior	50	50	50	50
POTENCIA DEL MOTOR	kW(HP)	7,5(10)	15(20)	30(40)	75(100)
CONSUMO DE AGUA DEL PROCESO	m <sup>2</sup>	NO SE REQUIERE			
PESO DE LA MAQUINA	kg	1215	2525	4615	10150
DIMENSIONES	m	1,22	1,55	1,85	2,36
	m	1,22	1,55	1,85	2,36
	m	1,33	2,18	2,67	2,63

\* Fuente: Sepro Mineral Systems Corp. (2011)

### ESPECIFICACIONES CONCENTRADORES FALCON ULTRA FINOS (UF)

MODELO	UNIDADES	UF600	UF1500
CAPACIDAD RECOMENDADA DE SOLIDOS*	t/h	0.5	2
CAPACIDAD MÁXIMA DE PULPA	m <sup>3</sup> /hr	6	20
TAMAÑO MAXIMO RECOMENDADO DE LAS PARTÍCULAS	μ	<38	<38
MÍNIMO TAMAÑO DE CAPTURA EFECTIVA	μ	<5	<5
CONCENTRADO DE VOLUMEN DE LODOS POR CICLO	%	50	200
PORCENTAJE RECOMENDADO DE PULPA SÓLIDA*	%	5-15	5-15
AREA DE SUPERFICIE CONCENTRADA	cm <sup>2</sup>	3871	9680
RANGO DE FUERZA G	Superior	450	600
	Inferior	50	50
POTENCIA DEL MOTOR	kW(HP)	7.5(10)	45(60)
SUMINISTRO DE AGUA DE ENJUAGE	bar	6	6
CONSUMO DE AGUA DEL PROCESO	m <sup>2</sup>		
PESO DE LA MAQUINA	kg	1136	2450
DIMENSIONES	m	1,23	1,51
	m	1,23	2,00
	m	1,73	2,11



## ANEXO 2

### CUADRO COMPARATIVO

#### MÉTODOS DE PRECONCENTRACIÓN DE LOS MINERALES DE ORO

	VENTAJAS	DESVENTAJAS	RECOMENDACIÓN
<b>CANALETAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Bajo costo.</li> <li>➤ Gran capacidad.</li> <li>➤ Fabricación local.</li> <li>➤ No necesita energía – motor.</li> <li>➤ Buena recuperación (en caso de un buen diseño y manejo y oro liberado).</li> <li>➤ Alto grado de concentración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Baja recuperación de sulfuros auríferos en minería primaria.</li> <li>➤ Descarga del producto aurífero en forma discontinua.</li> <li>➤ Requiere mucha mano de obra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Usar canaleta con piso de alfombra (bayetas, frazadas, etc), sin rejillas o Trampas; en esta forma la pulpa fluye con poca turbulencia.</li> <li>➤ Buena recuperación del oro fino y obtención de una cantidad reducida de preconcentrado.</li> <li>➤ De tener carga con oro fino y grueso, se debe tamizar la carga y tratar cada tamaño en su canaleta respectiva.</li> </ul>
<b>JIGS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Versátil, se puede adecuar a todo tipo de materiales.</li> <li>➤ Ajustando sus variables, no requiere de mayor atención.</li> <li>➤ Recupera oro y sulfuros auríferos.</li> <li>➤ No necesita energía.</li> <li>➤ Bien para oro laminado.</li> <li>➤ Produce un concentrado rico.</li> <li>➤ Descarga continua de productos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Requiere personal experimentado.</li> <li>➤ No recupera oro muy fino.</li> <li>➤ Alto requerimiento de agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ En la minería primaria puede instalarse inmediatamente después del molino primario, para recuperar el oro grueso, el oro laminar o esponjoso y los sulfuros gruesos liberados, para impedir su retorno innecesario al molino en un circuito cerrado, evitando una mayor laminación del oro y la sobremolienda de los sulfuros.</li> <li>➤ También puede utilizarse para el enriquecimiento secundario de productos procedentes de otras etapas.</li> </ul>

<b>MESA CONCENTRADORA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Descarga continua de productos.</li> <li>➤ Permite obtener toda una gama de productos (concentrados, mixtos, colas).</li> <li>➤ Gran flexibilidad.</li> <li>➤ Manejo y supervisión relativamente simple.</li> <li>➤ Posibilidad de recuperar valiosos minerales acompañantes.</li> <li>➤ Buena recuperación y un alto índice de enriquecimiento, aún en el mineral fino.</li> <li>➤ Poco uso de agua y energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Requiere supervisión continua.</li> <li>➤ Peligro de robo de concentrado rico.</li> <li>➤ Requiere de alimentación continua.</li> <li>➤ Requiere energía – motor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Principalmente se puede usar las mesas en la minería aurífera filoniana (vetas), para la recuperación de oro fino liberado y muchas veces para la recuperación de piritas/sulfuros auríferos como subproducto comerciales de la carga bruta o de concentrados obtenidos por otros equipos gravimétricos como canaletas y/o espirales.</li> </ul>
<b>CONCENTRADORES DE ESPIRAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Operación simple y visible.</li> <li>➤ No tiene motor.</li> <li>➤ Descarga discontinua de varios productos.</li> <li>➤ Buena recuperación de oro y sulfuros hasta 30 um de tamaño.</li> <li>➤ Gran flexibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Necesitan 4 m de altura o una bomba para alimentación.</li> <li>➤ Producen concentrados relativamente pobres.</li> <li>➤ Requieren alimentación continua y densidad de pulpa controlada.</li> <li>➤ Requieren de una densidad de pulpa entre 30 y 40 %.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Se utiliza principalmente para la preconcentración directamente después del molino.</li> </ul>
<b>CONCENTRADORES CENTRÍFUGOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Buena recuperación de oro fino/ultrafino y laminado.</li> <li>➤ Alto grado de enriquecimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Requiere agua limpia y de presión constante.</li> <li>➤ Equipo relativamente costoso.</li> <li>➤ Difícil para manejar.</li> <li>➤ Mala recuperación de sulfuros auríferos.</li> <li>➤ Requiere alimentación bien clasificada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Los centrífugos trabajan perfectamente para la recuperación de oro fino de colas de otros equipos gravimétricos.</li> </ul>

## ANEXO 3

### TIPOS GEOMÉTRICOS DE INTERCRECIMIENTOS ENTRE MINERALES

POSIBILIDADES DE LIBERACIÓN COMPLETO (MALLAS < 150)

	I	II	III	IV	LIBERACION		I	II	III	IV	LIBERACION
1a SIMPLE					FACIL	2d COLOFORME					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE
1b AMEBOIDE					MODERADAMENTE FACIL	3a SANDWICH					MODERADAMENTE FACIL A DIFICIL
1c GRAFICO					IMPOSIBLE	3b ESTRATIFICADO					IMPOSIBLE
1d DISEMINADO					IMPOSIBLE	3c RETICULAR					IMPOSIBLE
1e INCLUSION					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	3d VETEADO					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE
2a CORONA					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	4a BORDE COMPUESTO					MUY DIFICIL
2b SUB-CORONA					MUY DIFICIL	4b COMPENETRACION					MODERADAMENTE DIFICIL
2c CONCENTRICO					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	4c INTERSTICIAL					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE

## ANEXO 4

### Gold MAX

Gold MAX – AGENTE LIXIVIANTE QUE REEMPLAZA AL CIANURO

Gold MAX agente de extracción de oro, ha sido sometido a todas las pruebas pertinentes y que garantizan la total funcionalidad y eficacia de el producto, realizándose pruebas exhaustivas con todo tipo de mineral y en todas las condiciones garantizando altas recuperaciones Au-Ag, tanto en minerales oxidados, Sulfuros y Mixtos.

#### Funcionamiento

La Lixiviación con Gold MAX, se desarrolla en forma eficiente en pH =11-12 es muy estable y fiable en el rendimiento, con una mayor tasa de lixiviación por unidad de tiempo, lo que proporciona rapidez en el tiempo de extracción (cinética), es decir estable en eficiencia y rendimiento. Exhibiendo marcadas ventajas técnico-económicas, cuando se le compara con otros productos similares que se ofrecen en el mercado , ya que estos no actúan eficientemente con todo tipo de mineral, muy por el contrario presentan consumos elevadísimos, reportándose en los estudios realizados hasta 7 a 12 veces consumos más altos, que cuando se usa Gold MAX.

#### Almacenamiento

Gold MAX es un producto altamente estable y puede almacenarse largos periodos sin sufrir efecto de descomposición siempre que se le proteja de los elementos, como Luz solar y llluvias.

#### Transporte y Manejo

Este reactivo, no está sujeto a fiscalización, ni control de ninguna índole, ante algún control policial y sunat el procedimiento es como se aplica a cualquier químico común y corriente. Lo que no ocurre con productos fiscalizados o controlados como el NaCN, que si está sujeto a controles.

#### Composición sobre los componentes

Descripción: Mezcla formada por las sustancias especificadas a continuación con adiciones		
Componentes	CAS número	Aproximado (%) por peso.
óxido de sodio (Na <sub>2</sub> O)	1313-59-3	35-50%
nitrógeno (N)	7727-37-9	12-20%
amonio (NH <sub>4</sub> )	14798-03-9	7-12%
Humedad (H <sub>2</sub> O)	7732-18-5	1-4%
Calcio (Ca)	7440-70-2	1-5%
Hierro (Fe)	7439-89-6	1-5%
Substancia insoluble en agua	---	3-8%

## CONDICIONES DE OPERACIÓN Y PARÁMETROS PARA REALIZAR PRUEBAS CON LIXIVIANTE Gold MAX

GRANULOMETRÍA	(93- 96 % -200 MALLAS)	<b>CONTROL DE LIXIACIÓN</b>	TIEMPO	<b>TEMPERATURA AMBIENTAL RECOMENDABLE</b>	
FUERZA GOLDMAX RECOMENDABLE	300 PPM - 400 PPM		2 HORAS 5 HORAS 8 HORAS 12 HORAS 18 HORAS 24 HORAS 30 HORAS 35 HORAS	11oC	40oC
DENSIDAD DE PULPA	30 % - 35 % SÓLIDOS			<b>PROCESO DE TITULACIÓN</b>	
TIEMPO AGITACIÓN RECOMENDABLE	20 A 35 HORAS - MÁS CORTO QUE CON CIANURO			NITRATO DE PLATA - ( En Solución)	4.33 GR/LT
pH-OPERACIÓN	11 A 12			IODURO DE POTASIO - (En solución al 5 %)	3 GOTAS
REGULADOR pH	CAL Y / O SODA CAUSTICA (NAOH)		<b>CONTROL - OPCIONAL</b>	TAMAÑO DE ALICUOTA	25 ML

CUADRO COMPARATIVO DE CONSUMOS (CIANURO VS GOLDMAX®) - EN FUNCION AL TIPO DE MINERAL		
TIPO DE MINERAL	CONSUMOS DE REACTIVOS	
	LIXIVIANTE GOLDMAX®	CIANURO (NACN)
ÓXIDOS	1 KG A 3KG	1 KG A 3KG
SULFURO	3 KG A 6 KG	3 KG A 6 KG
MIXTOS	SIMILAR A SULFUROS	SIMILAR A SULFUROS
RELAVES DE AMALGAMACIÓN	6 KG A 7 KG - CON BUENAS RECUPERACIONES	7 KG - 15 KG A MÁS RECUPERACIONES DEFICIENTES

## ANEXO 5

### CUADRO COMPARATIVO

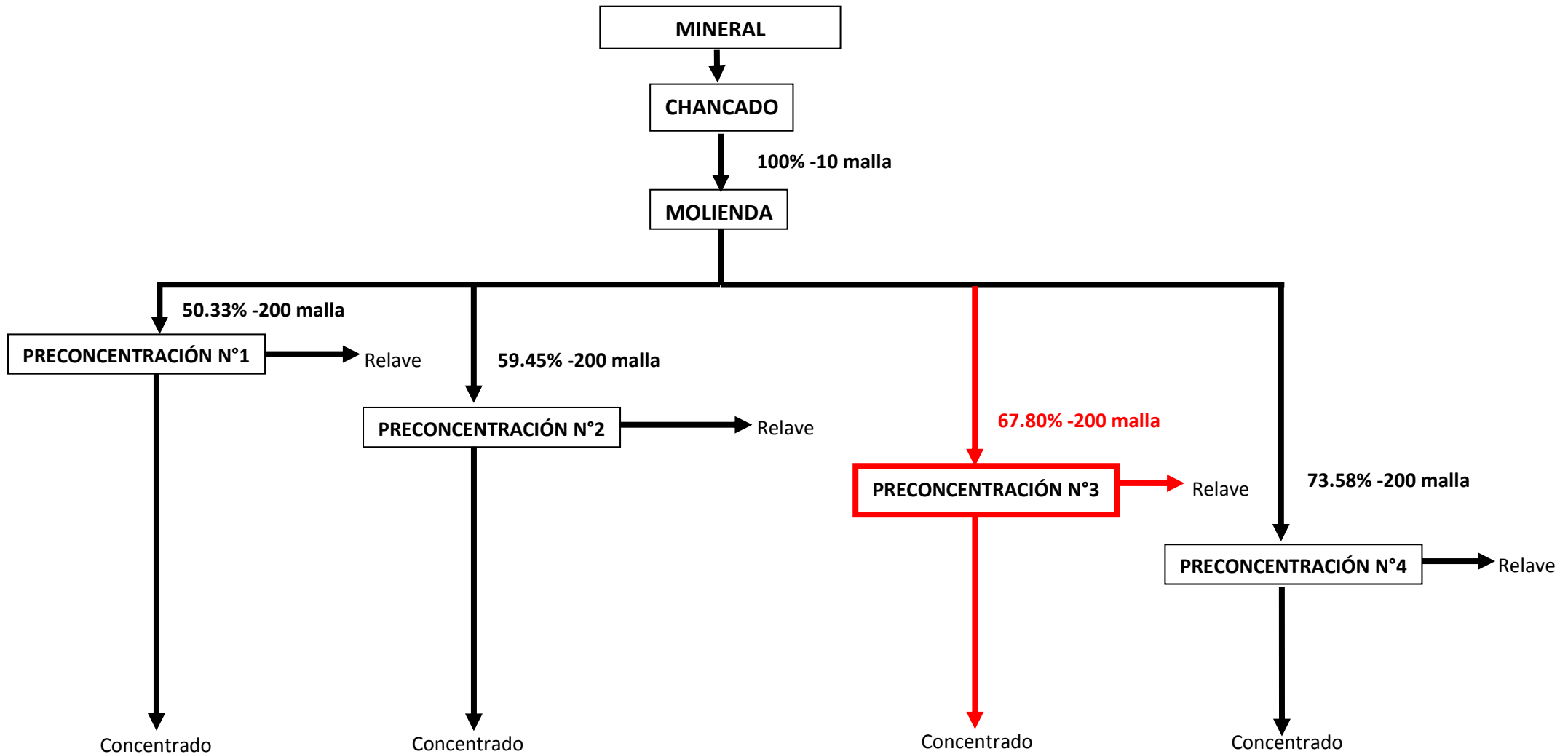
EQUIPOS PREVIOS A LA PRECONCENTRACIÓN

	CARACTERISTICAS	BENEFICIOS
<b>CHANCADORAS GIRATORIAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Diseñada para requisitos de servicio bajos y una operación fácil, se ajustará rápidamente a cualquier planta de trituración existente o propuesta.</li> <li>➤ Diseño contra-balanceado que hace de la trituradora ideal para instalaciones móviles y estacionarias y minimizan las fuerzas transmitidas a la estructura de apoyo.</li> <li>➤ Indicador de desgaste del cojinete de paso patentado que identifica los cojinetes desgastados, eliminándolos, adivinando o viéndose en la obligación de desarmar la trituradora para realizar una inspección.</li> <li>➤ Cojinete superior útil de la araña y sello de aceite que acorta los intervalos de mantenimiento.</li> <li>➤ Sistema de lubricación automática de la araña que asegura que el cojinete de la araña estén constantemente lubricados.</li> <li>➤ Cóncavos estándar de manganeso para un rendimiento efectivo de costo con aleación disponible y cóncavos de doble grada para una vida más larga y menos partes.</li> <li>➤ Cilindro de equilibrio cargado de nitrógenos que asegura que los componentes del paso no se separen en caso de un salto en el pique principal.</li> <li>➤ Sistema de automatización disponible para monitorear las presiones y temperaturas de aceite y las condiciones del cojinete para asegurar la salud del equipo.</li> <li>➤ Diseño de cojinete óptimo que permite que la trituradora opere tan eficientemente en la medida de lo posible, minimizando las pérdidas mecánicas y la disipación del calor.</li> </ul>	<p>Las trituradoras giratorias combinan la tecnología probada con los últimos avances de la metalurgia para lograr una eficiencia superior y una alta salida ofreciendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Una cámara de trituración empinada y superficies grandes de trituración para una capacidad excepcionalmente alta y la vida máxima del revestimiento.</li> <li>➤ Un marco extra para trabajos pesados, un conjunto integral para el pique principal de largo diámetro y un arreglo del cojinete de alto rendimiento que entregan una larga vida y una operación confiable.</li> <li>➤ El diseño de cámara de trituración correcto que resulta en una producción optimizada para su aplicación.</li> <li>➤ La capacidad de la trituradora se puede relacionar a los requerimientos de la planta mediante un simple cambio del cojinete excéntrico.</li> <li>➤ Debido a su posicionamiento dentro de la trituradora y utilización de las herramientas especializadas del servicio, se puede tener acceso y utilidad a todos los componentes internos.</li> </ul>

<b>CHANCADORAS DE MANDIBULA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La fiabilidad de las chancadoras (trituradoras) de mandíbula, está basada en una construcción revolucionaria sin soldaduras, anclada y atornillada. Este diseño proporciona excelente resistencia a la fatiga incluso en las más duras extracciones o aplicaciones en minería.</li> <li>➤ Las chancadoras (trituradoras) de mandíbula son los equipos de mandíbula más productivos y rentables para cualquier uso en trituración primaria. Los chancadores de mandíbula fueron creados originalmente para triturar los minerales y rocas más duros, de manera que se desempeñan muy bien además en los usos de menos demanda, tales como, rocas blandas, reciclaje y escoria.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Alta producción.</li> <li>➤ Alta proporción de reducción.</li> <li>➤ Fácil mantenimiento.</li> <li>➤ Alto tiempo de actividad.</li> </ul>
<b>CHANCADORAS DE CONO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La chancadora de cono es una chancadora giratoria modificada. La principal diferencia es el diseño aplanado de la cámara de chancado para dar alta capacidad y alta razón de reducción del material. El objetivo es retener el material por más tiempo en la cámara de chancado para realizar mayor reducción de este en su paso por la máquina.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Disponibilidad imbatible y diseño robusto.</li> <li>➤ Hasta un consumo de energía 20% menor que con otras chancadoras.</li> <li>➤ Mantenimiento rápido y fácil.</li> </ul>
<b>MOLINO DE BOLAS Y PEBBLES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Rango de tamaño de 5' x 8' con 75 HP a 30' x 41' y no más de 30000 HP</li> </ul> <p>Tamaño del Alimentador:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Menas duras: 80% pasando ¼" (6 mm o más finas)</li> <li>➤ Menas suaves: 80% pasando 1" (25 mm o más finas)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Operación automática, la cual ahorra energía.</li> <li>➤ Software de acompañamiento para apoyar los circuitos más complicados y las menas más complejas.</li> </ul>
<b>MOLINOS SAG/AG</b>	<p>El tamaño de alimentación de estos molinos está limitado al tamaño máximo que se puede prácticamente transportarse e introducir en las grandes rampas de alimentación del molino. Y el producto del chancado (trituración) AG/SAG grande es de un tamaño terminado listo para procesar, o bien de un tamaño inmediato para su posterior chancado (trituración) en un molino de bola, molino de piedras.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Mejora la estructura del mineral obtenido.</li> <li>➤ Buena liberación con un mínimo de finos.</li> <li>➤ Relaciones de reducción de 1000:1 (suprimiendo varias etapas de machaqueo y molienda).</li> <li>➤ Reducción de instalaciones de manejo, clasificación, almacenamiento intermedio, etc. (ahorro de equipos).</li> <li>➤ Reducción de costes de mantenimiento</li> <li>➤ Bajos desgastes metálicos (1000 g/t tratada)</li> <li>➤ Contaminación de la carga baja</li> </ul>

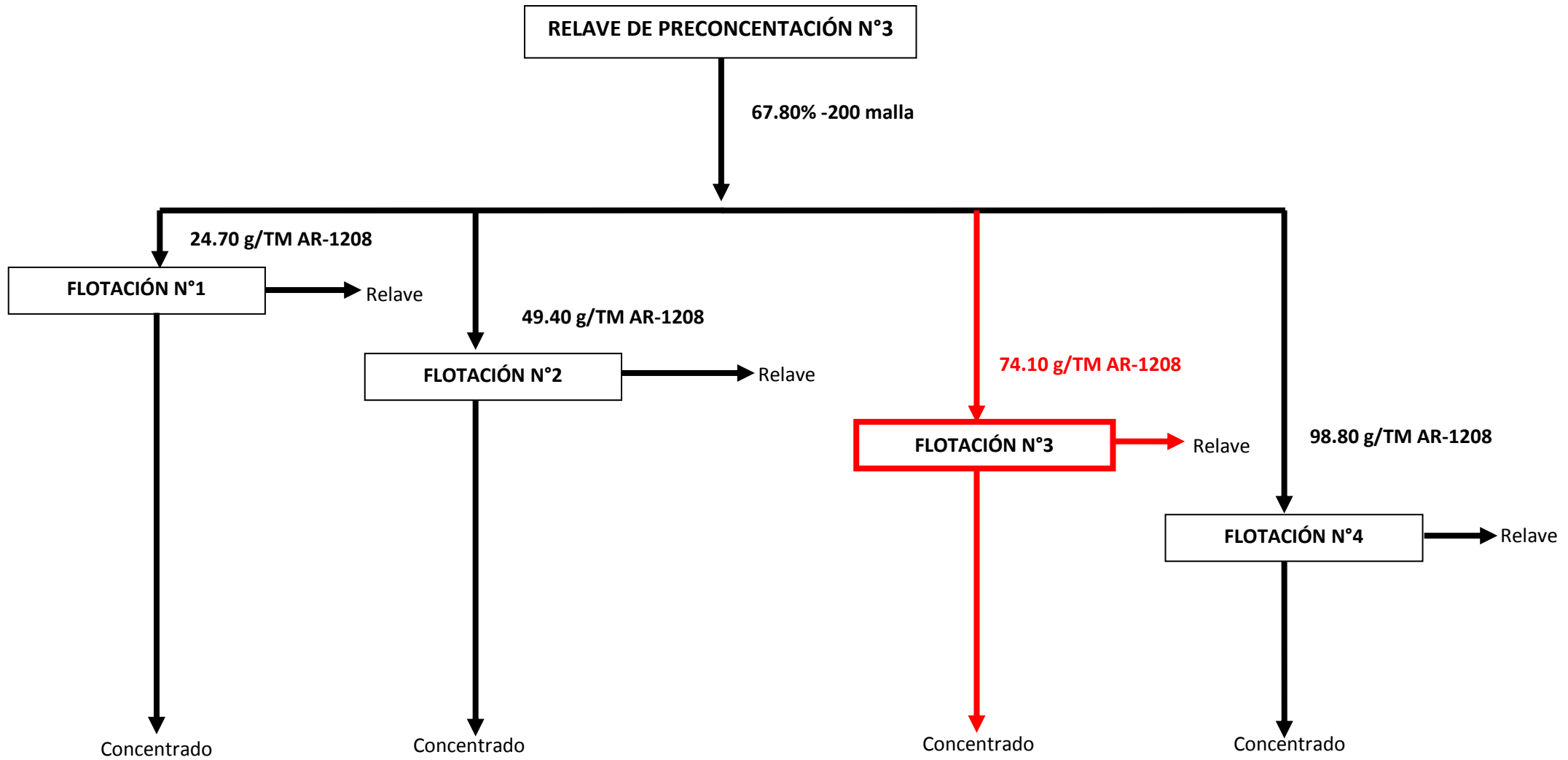
## ANEXO 6

### DIAGRAMA DE FLUJO - PRUEBAS DE PRECONCENTRACIÓN

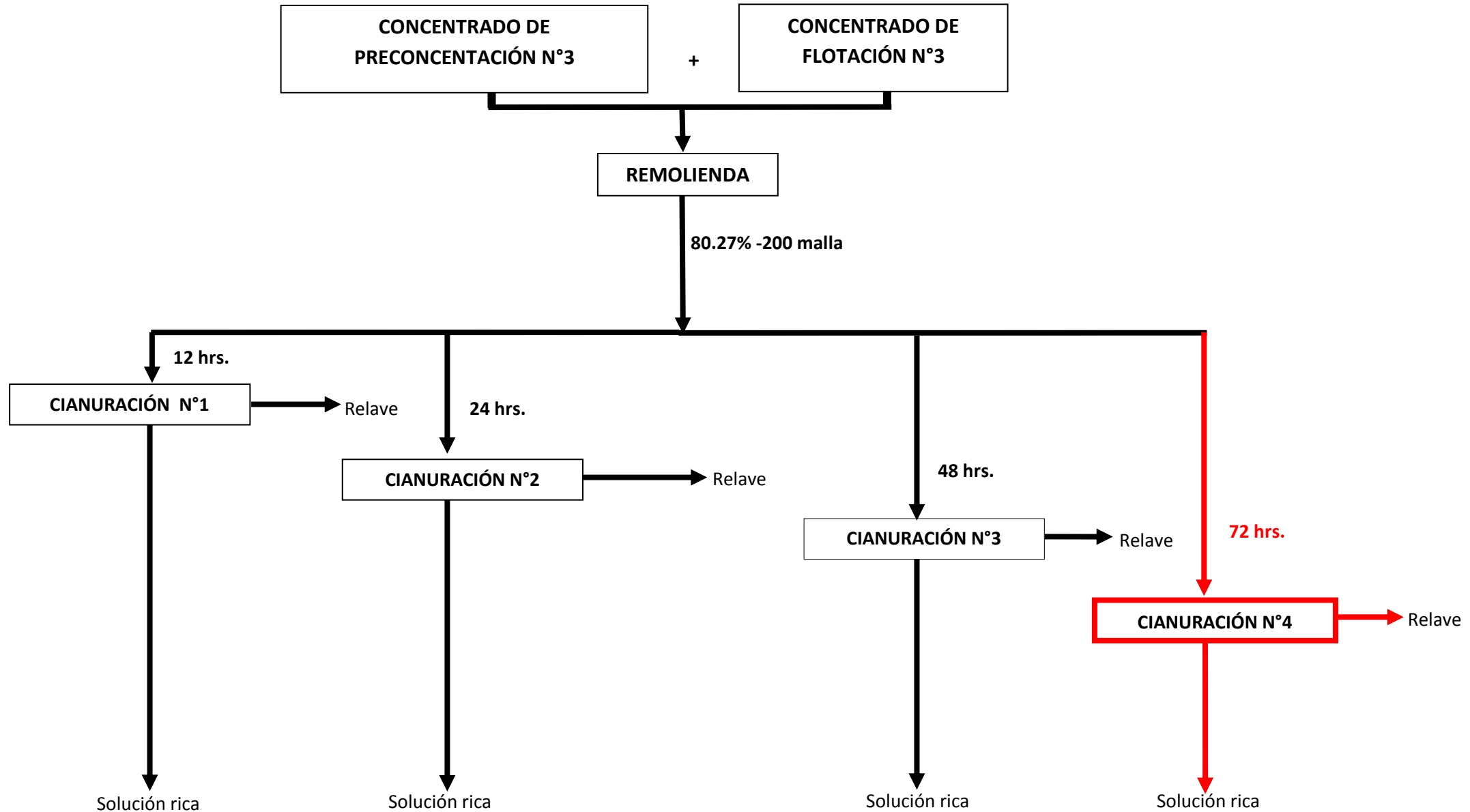




## DIAGRAMA DE FLUJO - PRUEBAS DE FLOTACIÓN



## DIAGRAMA DE FLUJO - PRUEBAS DE CIANURACIÓN



## ANEXO 7

### GALERÍA DE IMÁGENES



Fig.A – Mineral sulfurado (ley de cabeza de 0.62 g/TM), 100% + 4".



Fig.B – Chancadora de Quijada 5" x 6". RPM: 1730



Fig.C – Producto del chancado 100% -10 malla .



Fig.D – Billas de acero, como medio molidor en el Molino de Bolas.

Carga de bolas: 4 Kg. de  $\varnothing$  2".

7 Kg. de  $\varnothing$  1.5".

2 Kg. de  $\varnothing$  1".





Fig. E – Molino de Bolas (tipo pera). RPM: 55



Fig.F – Mineral más agua como alimento en el Molino de Bolas. Relación Sólido - Líquido de 2/1.

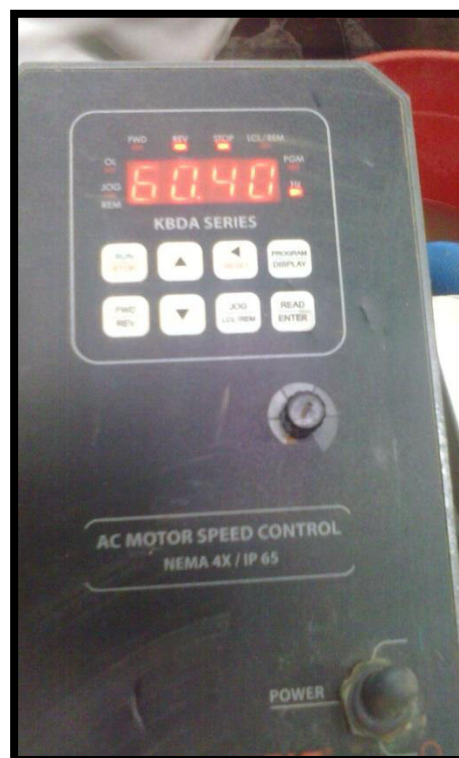


Fig.G – Controlando la Fuerza de Gravedad en el concentrador Falcon a 60 G's, 3 psi.



Fig.H – Retirando el concentrado en el Concentrador Falcon.





Fig.I – Retirando el relave en el Concentrador Falcon.



Fig.J – Reactivos de Flotación (Xantato, AR- 1208, AR- 1242, Z11)



Fig.K – Acondicionamiento de reactivos en la celda de flotación. (MIBC)



Fig.L – Acondicionamiento de reactivos en la celda de flotación. (AR-1208 y AR-1242)





Fig.M – Preparación de la Prueba de Cianuración



Fig.N – Adicionando mineral (80.27% -200 malla) en las botellas de cianuración.





Fig.O – Relación líquido - solido 2/1.



Fig.P – Botellas de Cianuración.



Fig.Q – Prueba de cianuración en botellas. RPM: 65



Fig.R – Titulación de la solución cianurada.